

Metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan



© BSN 2016

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh isi dokumen ini dengan cara dan dalam bentuk apapun serta dilarang mendistribusikan dokumen ini baik secara elektronik maupun tercetak tanpa izin tertulis dari BSN

BSN
Email: dokinfo@bsn.go.id
www.bsn.go.id

Diterbitkan di Jakarta

Daftar isi

Daftar isi.....	i
Prakata	iv
Pendahuluan.....	v
1 Ruang lingkup.....	1
2 Acuan normatif	1
3 Istilah dan definisi	1
4 Ragam keruntuhan	2
5 Sifat teknik material	5
6 Metode analisis rembesan air.....	9
7 Pengendalian rembesan air dan pertimbangan desain	12
Lampiran A	16
Lampiran B	26
Lampiran C	36
Lampiran D	45
Bibliografi	51
Gambar 1 - Pengontrolan rembesan air pada bendungan tipe urugan	13
Gambar A.1 - Koefisien permeabilitas ekuivalen dari susunan rekahan paralel yang sederhana.....	16
Gambar A.2 - Koefisien permeabilitas tanah non kohesif berdasarkan ukuran butir, keseragaman, dan kepadatan	17
Gambar A.3 - Koefisien permeabilitas untuk berbagai kelas material geologi	18
Gambar A.4 - Hubungan antara porositas dan <i>specific yield</i>	18
A.5a - Daya isap (<i>suction</i>) tanah untuk tanah nonkohesif	19
Gambar A.5b - Daya isap tanah nonkohesif halus	20
Gambar A-5c - Daya isap tanah kohesif.....	21
Gambar A.6 - Hubungan antara koefisien permeabilitas relatif dan kadar air, volumetrik....	22
Gambar B.1 - Persamaan permeabilitas untuk tanah berlapis	27
Gambar B.2 - Metode transformasi untuk analisis bendungan anisotropi ^[8.9]	28
Gambar B.3 - Pengaruh penetrasi sebagian dari parithalang ^[8.9]	29
Gambar B.4 - Pengaruh penetrasi sebagian dinding halang (<i>Cutoff Wall</i>) ^[8.9]	30
Gambar B.5 - Efisiensi selimut kedap air dan dinding halang ^[8.9]	31
Gambar B.6 - Analisis sistem sumur pelepas tekanan ^[8.9]	32

Gambar B.7 - Desain berm rembesan di hilir ^[8.9] , $k_f > k_z$	33
Gambar B.8 - Persamaan untuk perhitungan selimut kedap air ^[8.9]	34
Gambar B.9 - Persamaan untuk perhitungan selimut semikedap air ^[8.9]	35
Gambar C.1 - Garis aliran pada kondisi masuk (<i>entrance</i>), keluar (<i>discharge</i>), dan pembelokan (<i>deflection</i>).....	37
Gambar C.2 - Penentuan garis freatik untuk potongan yang homogen pada fondasi kedap air (untuk $\alpha < 60^\circ$).....	38
Gambar C.3 - Penggambaran garis freatik untuk potongan homogen dengan fondasi kedap air ($\alpha < 60^\circ$).....	39
Gambar C.4 - Perhitungan dan kebutuhan dasar untuk menentukan jaring-jaring aliran rembesan.....	40
Gambar C.5 - Perhitungan rembesan melalui fondasi.....	41
Gambar C.6 - Rembesan melalui tubuh bendungan dan fondasi.....	42
Gambar C.7 - Contoh tipe penggambaran jaring alir rembesan.....	43
Gambar C.8 - Contoh jaring alir rembesan tiga dimensi.....	44
Gambar D.1 - Quasi – Model sumur patus dengan elemen hingga tiga dimensi.....	45
Gambar D.2 Studi sumur patus elemen hingga kuasi tiga dimensi.....	46
Gambar D.3 - Kontur gradien keluaran studi model elemen hingga tiga dimensi.....	47
Gambar D.4 - Gradien keluaran vertikal studi model elemen hingga.....	48
Gambar D.5 - Analisis rembesan studi model elemen hingga.....	49
Gambar D.6 - Studi rembesan model elemen hingga tiga dimensi bendungan Callamus yang mempengaruhi kedalaman penetrasi dinding halang terhadap bocoran.....	50
Tabel 1 - Metode analisis rembesan air.....	10
Tabel A.1 Permeabilitas (k_v) material inti bendungan (k_v disesuaikan dengan % butiran halus).....	23
Tabel A.2 Permeabilitas (k_v) material pelindung stabilitas bagian luar (<i>shell</i>) bendungan (k_v disesuaikan dengan % butiran halus).....	23
Tabel A.3 Permeabilitas (k_v) material drainase bendungan (k_v meningkat sesuai dengan peningkatan ukuran butir).....	23
Tabel A.4 Anisotropi (k_h/k_v) material bendungan (k_h/k_v meningkat dengan peningkatan kadar air pemadatan).....	23
Tabel A.5 Permeabilitas (k_h) tanah alami tak terkonsolidasi (k_h disesuaikan dengan % butiran halus).....	24
Tabel A.6 Permeabilitas (k_h) batuan tanpa rekahan (k_h disesuaikan dengan % ukuran butir).....	24
Tabel A.7 Anisotropi tanah alami dan batuan asli.....	24

Tabel A.8	Porositas (n) tanah urugan (n meningkat dengan keseragaman)	25
Tabel A.9	Porositas (n) tanah alami tak terkonsolidasi (n disesuaikan dengan kepadatan)	25
Tabel A.10	Porositas (n) batuan	25



Prakata

Standar Nasional Indonesia tentang “Metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan” disusun untuk memberikan dasar-dasar analisis dan cara pengendalian rembesan air sebagai acuan dengan mempertimbangkan semua aspek rembesan air dalam desain, baik desain bendungan tipe urugan baru maupun desain modifikasi bendungan lama tipe urugan, serta memberikan rekomendasi praktis dalam analisis rembesan air.

Standar ini dipersiapkan oleh Komite Teknis 91-01 Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil pada Subkomite Teknis 91-01-S1 Sumber Daya Air melalui Gugus Kerja Balai Bangunan Hidraulik dan Geoteknik Keairan dan telah dibahas dalam forum rapat konsensus yang diselenggarakan pada tanggal 4 Desember 2013 yang melibatkan para narasumber, pakar dan instansi terkait, serta telah melalui proses jajak pendapat tanggal 28 Agustus 2014 hingga 27 Oktober 2014.



Pendahuluan

Desain suatu bendungan tipe urugan yang menahan air dalam volume yang besar perlu mempertimbangkan faktor keamanan terhadap pengaruh rembesan air. Dari pengalaman di beberapa negara di dunia, 38% dari bendungan tipe urugan yang mengalami keruntuhan disebabkan oleh pengaruh rembesan air.

Sampai sekarang buku petunjuk mengenai metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan belum ada di Indonesia. Oleh karena itu, perlu disusun suatu standar yang dapat digunakan sebagai acuan bagi pendesain bendungan tipe urugan. Standar ini membahas ragam keruntuhan dan kriteria desain, sifat kelulusan air (permeabilitas) material, metode analisis rembesan air dan metode pengendalian rembesan air, serta pertimbangan desain.



Metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan

1 Ruang lingkup

Standar ini membahas ragam keruntuhan pengaruh gaya rembesan air, sifat teknik material, metode analisis rembesan air, cara pengendalian rembesan air, dan pertimbangan desain bendungan tipe urugan.

Standar ini memberikan dasar-dasar analisis rembesan air untuk :

- a) mengetahui efektivitas berbagai teknik pengendalian rembesan air;
- b) memberi data kuantitatif dan cara pengujian parameter permeabilitas tanah untuk desain sistem pengontrolan yang dipilih;
- c) memperkirakan rembesan air pada tubuh dan fondasi bendungan; dan
- d) memberi saran penempatan instrumen rembesan air seperti pisometer dan pengamat rembesan lainnya.

2 Acuan normatif

Dokumen referensi di bawah ini harus digunakan dan tidak dapat ditinggalkan untuk melaksanakan pedoman ini:

SNI 03-2393-1991, *Injeksi semen pada batu, Tata cara pelaksanaan*

SNI 2411:2008, *Cara uji kelulusan air bertekanan di lapangan*

SNI 2435:2008, *Cara uji kelulusan air benda uji tanah di laboratorium dengan tekanan tetap*

SNI 3423:2008, *Cara uji analisis ukuran butir*

3 Istilah dan definisi

Istilah dan definisi berikut berlaku untuk penggunaan standar ini:

3.1

aliran jenuh

aliran yang melewati media porus di dalam zona dengan tekanan air pori positif di bawah garis freatik; aliran jenuh biasanya terjadi akibat gradien hidraulik pengaruh gravitasi air waduk di udik bendungan dan daerah keluaran air di hilir bendungan

3.2

aliran tak jenuh

aliran melewati media porus di dalam zona dengan tekanan air pori negatif yang berada di atas garis freatik; biasanya terjadi karena perbedaan daya isap kapiler permukaan (*capillary surface tension*), yang menyebabkan terjadinya gradien hidraulik antara zona jenuh dan daerah keluaran air

3.3

anisotropi

sifat alami material yang tidak sama dalam segala arah; dalam analisis rembesan air, anisotropi berhubungan dengan nilai koefisien permeabilitas yang tidak sama, yaitu yang searah bidang perlapisan (arah horizontal k_h) dan yang tegak lurus perlapisan (arah vertikal k_v)

3.4**garis freatik**

garis aliran air yang berhubungan dengan bidang imajiner dalam tubuh dan/atau fondasi bendungan, yang tekanan air porinya sama dengan tekanan atmosfer

3.5**gaya perembesan air**

gaya yang terjadi akibat aliran air dalam zona jenuh air dengan arah yang sama dengan arah aliran

3.6**gradien hidraulik**

perbandingan tinggi potensial hidraulik antara dua titik dibagi jaraknya dalam media aliran tanpa dimensi; tinggi potensial hidraulik biasanya dinyatakan sebagai penjumlahan tinggi tekanan air pori yang dinyatakan dalam unit tinggi dan tinggi elevasi titik yang ditinjau terhadap suatu datum tertentu

3.7**permeabilitas**

kapasitas rata-rata dari suatu media aliran porus untuk melewatkan air di bawah suatu unit gradien tertentu, dalam kondisi aliran laminar; permeabilitas primer adalah aliran air yang melewati ruang pori dari media porus; permeabilitas sekunder adalah aliran air yang melewati bukaan terbatas dalam suatu media, seperti rekahan atau saluran kecil akibat pelarutan

3.8**rembesan air**

semua gerakan air dari waduk melewati tubuh dan fondasi bendungan yang merupakan fungsi dari waktu, dan termasuk aliran melewati media porus, rekahan, dan saluran kecil

3.9**retak susut**

retakan yang terjadi akibat penurunan kadar air dalam tanah (inti kedap air) hingga jauh di bawah kadar air pada waktu pelaksanaan

3.10**susut**

pengeringan atau penurunan kadar air dalam tanah, terutama terjadi pada bendungan tipe urugan tanah dan berpotensi mengalami retak susut

3.11**tekanan air pori**

tekanan air dalam rongga butiran tanah yang berhubungan satu dengan yang lainnya di dalam tubuh dan fondasi bendungan, baik tekanan air pori positif ($>$ tekanan atmosfer) yang terjadi karena pengaruh gravitasi maupun tekanan air pori negatif (*suction*) karena pengaruh isapan permukaan

4 Ragam keruntuhan

Untuk menilai apakah suatu bendungan tipe urugan aman terhadap gaya-gaya perembesan air, maka dalam tahap desain perlu dilakukan analisis rembesan air. Hasil analisis tersebut kemudian dibandingkan dengan kriteria desain, yang biasanya dinyatakan dengan faktor keamanan. Ragam keruntuhan pengaruh gaya rembesan air pada umumnya dibagi dalam lima jenis.

4.1 Gradien keluaran melampaui batas

Bila gradien keluaran (I_e) tercatat melampaui batas, butiran tanah di dalam bagian kaki bendungan akan terapung dan terlepas dari ikatannya. Hal ini terutama terjadi akibat berkurangnya gaya gravitasi, dan tergantung pada jenis tanahnya sehingga menimbulkan hal-hal seperti di bawah ini.

4.1.1 Didih pasir (*sandboil*)

Didih pasir biasanya terjadi di dalam tanah tak berkohesi dengan persentase butiran kasar (kerikil) tinggi, dan butiran halus yang diendapkan di permukaan. Tanah yang mengalami didih pasir, struktur butiran kasarnya tetap stabil sehingga menyebabkan adanya peningkatan permeabilitas tanah.

4.1.2 Likuifaksi statis

Likuifaksi statis biasanya terjadi di dalam tanah nonkohesif dengan gradasi butiran lebih halus (pasir halus dan lanau). Massa tanah di sebelah hilir dapat mengalami likuifaksi bila air waduk meningkat karena gradien hidrolik mencapai gradien kritis (I_c).

4.1.3 Erosi buluh (*piping*)

Erosi buluh terjadi di dalam massa fondasi atau urugan yang berkohesi. Proses erosi buluh dimulai pada satu titik diskontinuitas di sebelah hilir atau konsentrasi aliran air. Sebagai contoh seperti pemadatan yang kurang baik pada bidang kontak antara bendungan dan struktur memanjang dari udik ke hilir, lubang yang terbuka, akar tanaman dan lubang buatan binatang. Butir-butir tanah terlepas mulai di sebelah hilir sehingga terjadi pembentukan pipa kecil yang merambat secara perlahan-lahan ke udik bendungan. Biasanya lintasan lubang kecil tersebut mempunyai bentuk seperti jaring alir (*flownet*). Untuk mencegah kejadian semacam ini, harus dibuat suatu sistem pengontrol yang perlu diamati secara kontinu di lokasi-lokasi rembesan terkonsentrasi.

Faktor keamanan biasanya dinyatakan sebagai nilai banding antara gradien kritis (I_c) dan komponen vertikal dari gradien keluaran. Gradien ini diperoleh dari perhitungan atau pembacaan langsung pada instrumen pisometer di lapangan, dan dapat dihitung dengan persamaan [1] dan [2].

$$FK = \frac{I_c}{I_e} \geq 4 \quad (1)$$

$$I_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2)$$

Keterangan :

- FK adalah faktor keamanan (tanpa dimensi);
- I_c adalah gradien keluaran kritis (tanpa dimensi);
- I_e adalah gradien keluaran dari hasil analisis rembesan atau pembacaan instrumen pisometer (tanpa dimensi)
- γ' adalah berat volume efektif (terendam) (t/m^3);
- γ_w adalah berat volume air (t/m^3);
- G_s adalah graviti spesifik (tanpa dimensi);
- e adalah angka pori (tanpa dimensi);

Nilai rata-rata G_s biasanya digunakan untuk berbagai perhitungan gradien keluaran karena variasi nilainya tidak berbeda jauh untuk jenis tanah yang berbeda. Namun, nilai e di lapangan untuk berbagai jenis tanah bervariasi cukup besar, Oleh karena itu, penaksirannya (bila tidak ada data hasil pengujian) harus dilakukan secara hati-hati berdasarkan pengalaman dan pertimbangan teknis yang baik pula.

Bila tidak ada informasi mengenai nilai graviti spesifik G_s atau angka pori e , dapat digunakan $I_c = 1$ yang kurang lebih identik dengan kondisi pasir kuarsa di lapangan. Nilai ini bukan nilai konservatif sehingga harus digunakan secara hati-hati. Karena nilai I_c yang lebih rendah yaitu sebesar 0,5, pernah terukur oleh beberapa peneliti untuk jenis tanah pasir halus dan lanau.

Faktor keamanan minimum untuk desain harus diambil minimal 4 untuk mencegah terjadinya keruntuhan karena pengaruh gradien keluaran yang melampaui batas. Faktor ini terutama digunakan untuk mencegah hal-hal yang tidak diperhitungkan dalam tahap desain. Misalnya pengaruh heterogenitas tanah, kemunduran kualitas tanah yang merupakan fungsi dari waktu dan penyimpangan hasil perkiraan.

4.2 Tekanan air pori melampaui batas

Bila tekanan air pori di dalam fondasi dan tubuh bendungan melampaui batas, maka dapat terjadi beberapa jenis keruntuhan.

4.2.1 Ketidakstabilan lereng timbunan dan deformasi berlebihan

Tekanan air pori dan gaya perembesan air adalah penyebab utama kekhawatiran ketidakstabilan pada bendungan tipe urugan. (Kriteria desain ini dapat diperiksa pada SNI 8064:2016, Metode analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan).

4.2.2 Tekanan air pori di dalam fondasi

Tekanan air pori di dalam fondasi bendungan dapat menyebabkan terjadinya tekanan angkat yang tinggi pada bangunan air.

4.2.3 Tekanan air pori yang tinggi di hilir bendungan

Tekanan air pori yang tinggi di hilir fondasi bendungan dapat menimbulkan tekanan angkat tinggi, sehingga terjadi pengangkatan atau peletusan (*upheaval atau blowup*). Kondisi ini terjadi, bila terdapat lapisan fondasi dengan koefisien permeabilitas tinggi di bawah tubuh bendungan (lapisan takterkekang = *unconfined layer*). Keruntuhan akan mulai terjadi, bila tekanan angkat di bawah lapisan takterkekang melebihi tekanan overburden di atasnya, sehingga menyebabkan bobolnya lapisan takterkekang dan terjadi peningkatan gradien keluaran. Erosi buluh atau likuifaksi statis dapat terjadi pada lapisan di bawahnya. Untuk mendeteksi secara dini kondisi semacam ini, harus dipasang pisometer di hilir bendungan.

Faktor keamanan terhadap pengaruh tekanan angkat yang tinggi dihitung dengan menggunakan persamaan (3).

$$FK = \frac{\gamma_n t}{\gamma_w h} = \frac{G_s t}{(1+e)h} \geq 2 \quad (3)$$

Keterangan :

γ_n adalah berat volume material fondasi; (t/m³)

t adalah tebal overburden;(m)

h adalah tinggi tekanan pisometrik.(m)

4.3 Gradien internal yang tinggi tidak tersaring

Bila gradien tidak tersaring bernilai tinggi, maka akan terjadi perpindahan butiran halus dari satu zona ke zona lainnya di dalam bendungan tipe urugan, atau dari urugan ke dalam rongga pori tanah fondasi, seperti berikut:

- Selinit kedap air atau inti kedap air terletak di atas fondasi aluvial berbutir kasar atau batuan yang mengandung banyak rekahan.
- Inti kedap air dibuat miring dan tipis di atas zona drainase.
- Melewati puncak dinding halang kedap air dengan penutup yang sempit.

Untuk mencegah keruntuhan tipe ini, harus dipasang saringan (filter) sesuai dengan standar yang berlaku.

4.4 Debit rembesan melampaui batas

Debit rembesan yang melampaui batas tanpa membawa material halus bukan merupakan keruntuhan struktural, tetapi dapat menimbulkan kehilangan air yang besar sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan air.

4.5 Retak susut

Retak susut terjadi akibat penurunan kadar air di dalam inti kedap air hingga jauh di bawah kadar air pada waktu pelaksanaan. Hal ini dapat terjadi karena:

- penguapan di permukaan urugan;
- drainase ke dalam sistem drainase bendungan; dan
- drainase ke dalam fondasi bendungan yang porus.

Retak susut biasanya terjadi antara batas plastis dan batas susut atau bila kadar air turun di bawah batas plastis sehingga kuat geser juga dapat menurun.

5 Sifat teknik material

5.1 Pemilihan parameter koefisien permeabilitas untuk analisis

Koefisien permeabilitas adalah parameter tanah terpenting bagi analisis dan pengontrolan rembesan air. Standar uji permeabilitas tanah di laboratorium untuk media porus biasanya diperoleh dengan mengalirkan air akuades melewati massa tanah yang sudah jenuh pada temperatur 20°C.

Permeabilitas primer adalah kapasitas aliran air melewati struktur butiran tanah. Permeabilitas sekunder adalah kapasitas aliran air yang melewati rekahan atau bukaan pendek pada massa tanah. Permeabilitas primer biasanya relatif kecil dibandingkan dengan permeabilitas sekunder. Pada pengujian lapangan untuk batuan dengan rekahan, kondisi aliran tidak diketahui secara pasti apakah aliran laminar atau turbulen. Biasanya interpretasi hasil uji dan perhitungan permeabilitas dilakukan dengan anggapan aliran laminar.

Dalam penentuan kuantitas dan kecepatan aliran, seperti besarnya kehilangan air, penentuan ukuran sistem drainase, desain sumur pelepas tekanan (*relief well*) dan sistem *dewatering*, dibutuhkan data permeabilitas tanah. Beberapa cara penentuan permeabilitas tanah dibahas berikut ini.

5.1.1 Data terpublikasi

Koefisien permeabilitas tanah fondasi dapat diprediksi dengan menggunakan data terpublikasi bila telah ada penyelidikan geoteknik tetapi tidak ada data uji permeabilitas. Sumber data ini dapat digunakan sebagai studi pendahuluan atau desain final bila masalah rembesan air tidak kritis. Bila dianggap kritis, harus dilakukan penyelidikan tambahan yang lebih terperinci. Pada Tabel A.1 sampai dengan A.7, dan Gambar A.1 sampai dengan A.3 pada Lampiran A, diperlihatkan variasi koefisien permeabilitas untuk berbagai jenis tanah dan batuan.

5.1.2 Data teramati pada waktu desain atau konstruksi

Data teramati pada waktu desain atau konstruksi mempunyai tingkat variasi ketelitian yang tergantung pada jumlah pengujian lapangan. Data ini merupakan sumber awal, yang dapat digunakan dalam mempelajari rembesan air di dalam bendungan lama, dan biasanya mencakup:

- a) uji permeabilitas lapangan dari laporan penyelidikan geoteknik;
- b) uji permeabilitas di laboratorium; dan
- c) uji gradasi material.

5.1.3 Data hasil uji laboratorium

Data ini diperoleh dari hasil uji laboratorium pada contoh tanah tak terganggu dari material urugan sesuai dengan standar yang berlaku. Uji permeabilitas laboratorium sangat berguna untuk menguji bahan urugan berbutir halus dan bahan selimut kedap air. Dalam uji ini, gradien hidraulik dapat divariasikan, sehingga dapat mempersingkat waktu uji dibandingkan dengan uji lapangan. Beberapa metode uji dapat diuraikan sebagai berikut:

- a) Metode pengujian laboratorium tentang kelulusan air bertekanan konstan untuk tanah (SNI 2435:2008).
- b) Metode pengujian laboratorium tentang kelulusan air bertekanan jatuh bebas.
- c) Metode pengujian laboratorium analisis ukuran butir tanah (SNI 3423:2008).
- d) Data pembagian butir dapat digunakan untuk menaksir koefisien permeabilitas tanah dengan persamaan empiris dari *Hazen*.

$$k = C \times D_{10}^2 \quad (4)$$

Keterangan :

- k adalah koefisien permeabilitas [cm/s];
 - C adalah konstanta = 1, berlaku untuk pasir dan kerikil bergradasi seragam, tanpa sementasi dan bersih (lanau dan lempung < 5%);
 - D_{10} adalah ukuran butir yang lewat saringan 10 % pada kurva gradasi material (mm).
- Selain itu, dapat juga digunakan penaksiran nilai k menggunakan parameter lain seperti terlihat pada Gambar A.2 Lampiran A.

5.1.4 Data hasil uji lapangan

Data permeabilitas material fondasi yang paling akurat dapat diperoleh dari hasil uji lapangan dengan cara sebagai berikut:

- a) metode pengujian lapangan tentang kelulusan air bertekanan (SNI 2411:2008);
- b) uji pemompaan dalam lubang bor;
- c) uji infiltrasi dalam sumur dangkal;

- d) uji kelulusan air dengan alat permeameter cincin.

5.1.5 Data pengamatan fluktuasi muka air tanah

Data pengamatan fluktuasi muka air tanah diperoleh dari hasil pengujian dalam sumuran pada fondasi atau ebatmen dengan mengamati volume air yang masuk atau keluar dari sumuran.

5.1.6 Data hasil analisis

Data hasil analisis balik diperoleh dari hasil pengujian dan analisis numerik. Caranya adalah dengan mencoba-coba koefisien permeabilitas material sehingga menghasilkan kondisi yang sama dengan hasil pengamatan pisometer di lapangan (kalibrasi) .

5.2 Sifat anisotropi permeabilitas

Material tanah dan batuan biasanya bersifat anisotropik, termasuk material urugan dan fondasi bendungan. Sifat anisotropi permeabilitas, terutama terjadi karena pengaruh cara pengendapan atau cara pemadatan, bentuk partikel butiran, serta orientasi dan pola rekahan di dalam massa batuan.

5.2.1 Sifat anisotropi dalam urugan

- a) Urugan tanah berbutir halus
 - 1) Bendungan yang dipadatkan dengan baik mengikuti standar yang berlaku, nilai anisotropi $k_h/k_v = 2-10$
 - 2) Bendungan yang tidak dipadatkan secara baik atau berlapis-lapis, nilai anisotropi bisa mencapai $k_h / k_v = 50$
- b) Urugan tanah berbutir kasar biasanya digunakan sebagai bahan drainase yang dipadatkan dengan lapisan lebih tebal. Nilai anisotropinya k_h/k_v lebih kecil dibandingkan untuk tanah berbutir halus. Tabel A.4 menunjukkan variasi anisotropi untuk beberapa kondisi. Bila data tidak diperoleh, maka untuk perkiraan nilai anisotropi permeabilitas dapat digunakan Tabel A.4.

5.2.2 Sifat anisotropi dalam fondasi

Bila tidak ada data spesifik dari lapisan tanah dan batu untuk analisis, Tabel A.7 pada Lampiran A dapat digunakan untuk berbagai variasi nilai anisotropi.

- a) Batuan endapan yang berlapis-lapis, $k_h/k_v = 100$, biasanya tergantung pada pembagian butir per lapisan tanah (periksa Tabel A.4, Lampiran A).
- b) Endapan angin (*wind deposit*) $k_h/k_v = 0.02 - 2$.
- c) Batuan yang penuh rekakan, $k_h/k_v = 0.1-10$ biasanya agak sulit ditentukan dan tergantung pada orientasi rekahan, berat volume, dan ukuran bukaan rekahan.
- d) Batuan porus yang keras mempunyai nilai anisotropi agak rendah, yaitu $k_h/k_v = 1-3$.

5.2.3 Porositas

Porositas adalah sifat dasar yang digunakan dalam ilmu yang berhubungan dengan aliran air melewati media porus. Parameter ini merupakan nilai banding antara volume rongga pori dan volume total tanah, dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5).

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w G_s} \quad (5)$$

Keterangan :

- n adalah porositas (tanpa dimensi)
- γ_d adalah berat volume kering (t/m^3)
- γ_w adalah berat volume air (t/m^3)
- G_s adalah spesifik graviti (tanpa dimensi)

Nilai porositas mempengaruhi nilai koefisien permeabilitas tanah, tetapi tidak langsung menentukan koefisien permeabilitas. Tanah berbutir halus pada umumnya mempunyai porositas lebih tinggi daripada tanah berbutir kasar. Namun ukuran pori yang kecil mempunyai tahanan gesek lebih tinggi terhadap aliran air dan permeabilitasnya lebih rendah.

Porositas tidak langsung digunakan dalam permasalahan aliran jenuh, tetapi secara teoretis identik dengan batas atas kadar air volumetrik untuk aliran air takjenuh dalam bendungan tipe urugan.

Porositas efektif atau "*specific yield*" merupakan sebagian volume air dengan drainase dari suatu massa tanah secara gravitasi. Parameter ini dapat digunakan sebagai koefisien simpanan untuk permasalahan aliran air bebas (*unconfined flow*). Tabel A.8 sampai dengan Tabel A.10 memperlihatkan variasi nilai porositas untuk berbagai jenis tanah dan batuan. Gambar A.3 memperlihatkan hubungan antara porositas dan "*specific yield*".

5.2.4 Hubungan antara koefisien permeabilitas dan kadar air

Hubungan antara parameter koefisien permeabilitas dan kadar air merupakan suatu fungsi. Fungsi ini diperlukan untuk studi rembesan dalam bendungan tipe urugan dengan derajat kejenuhan yang berbeda-beda. Koefisien permeabilitas pada kondisi takjenuh biasanya dinyatakan dengan koefisien permeabilitas efektif (k_r) yang merupakan sebagian dari koefisien permeabilitas jenuh air (k). Bila tidak ada hasil uji permeabilitas, secara praktis dapat digunakan rumus empiris [6].

$$k_r = \left(\frac{\theta}{n} \right)^\varepsilon \quad (6)$$

$$\theta = \frac{(w\gamma_d)}{(100\gamma_w)} \quad (7)$$

Keterangan :

- n adalah porositas (tanpa dimensi);
- θ adalah derajat kejenuhan fraksional (tanpa dimensi);
- ε adalah konstanta berkisar antara 3 –6 (tanpa dimensi);

	Untuk material drainase yang dipadatkan	$\varepsilon = 3.5$
	Untuk material urugan yang dipadatkan dan batuan porous	$\varepsilon = 4.0$
	Untuk material tanah asli mengandung butiran halus	$\varepsilon = 4.5$
W	adalah kadar air tanah (tanpa dimensi);	
γ_d	adalah berat volume kering tanah (t/m^3);	
γ_w	adalah berat volume air (t/m^3);	

Selain itu hubungan antara koefisien permeabilitas dan kadar air atau tekanan air pori negatif dapat ditentukan dengan cara yang diberikan oleh *Corey* atau *Fredlund* dkk (2000).

5.2.5 Hubungan antara daya isap tanah dengan kadar air

Tekanan air pori negatif sebagai fungsi dari kadar air merupakan sifat tanah yang perlu diperhitungkan dalam evaluasi rembesan dengan derajat kejenuhan yang bervariasi. Daya isap tanah (*soil suction*) sangat mempengaruhi kekuatan geser tanah kohesif, yang biasanya menimbulkan tekanan air pori negatif di atas garis freatik bendungan. Dalam kasus-kasus tertentu, sering dibutuhkan tekanan air pori negatif terjadi dalam tanah lempung urugan dan fondasi, agar kondisi cukup stabil. Data ini dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut :

- Menggunakan data yang terpublikasi untuk tanah asli seperti diperlihatkan pada Gambar A.4 dan A.5 dari Lampiran A.
- Melakukan uji laboratorium khusus seperti diuraikan oleh *Fredlund* dkk [8.18].

6 Metode analisis rembesan air

Semua analisis yang diuraikan dalam standar ini berhubungan dengan metode perhitungan untuk memperkirakan besarnya rembesan air melewati tubuh dan fondasi bendungan.

6.1 Rencana analisis

Sebelum melakukan analisis rembesan air, terlebih dahulu perlu disusun suatu rencana analisis berikut ini :

- penjelasan singkat tentang maksud analisis;
- pemilihan metode analisis;
- kondisi yang akan dianalisis, yaitu:
 - kondisi pembebanan akibat perubahan muka air waduk;
 - parameter yang akan divariasikan;
 - data material yang digunakan untuk analisis yaitu :
 - sumber data;
 - tambahan pengujian lapangan dan laboratorium;
 - hasil kuantitatif yang akan diperoleh;
 - perkiraan harga dan waktu.
- Standar teknis, dalam Tabel 1 memperlihatkan ikhtisar tipe analisis dan metode analisis untuk beberapa situasi yang dapat digunakan. Standar ini hanya memberi suatu petunjuk umum untuk analisis rembesan air, dan tidak mencakup semua situasi secara detail yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, standar ini harus digunakan dengan hati-hati dan disesuaikan dengan pengalaman masing-masing. Dan bila diperlukan, dianjurkan untuk meminta advis teknis kepada tenaga spesialis dalam bidang ini, sesuai dengan tingkat kesulitan masalah yang dihadapi.

Tabel 1 - Metode analisis rembesan air

No.	Situasi	Penyelidikan tipikal	Metode yang dianjurkan
1	Urugan homogen dengan fondasi kedap air, aliran langgeng 2D	Garis freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas)	Grafis atau garis freatik menggunakan Gambar C.1 sampai dengan C.3
2	Urugan zonal dengan fondasi kedap air, aliran langgeng 2D	Garis freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas)	Jaring alir periksa Gambar C.4 atau model numerik (SEEP2D, PLAXIS, PC-SEEP, SEEP/W).
3	Urugan homogen dengan fondasi porous yang seragam, aliran langgeng 2D	Garis freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas) Gradien keluaran dan debit rembesan. Alternatif sistem pengendalian dan variasi parameter material	Jaring alir Gambar C.4 sampai dengan C.7 Model numerik (SEEP2D, PLAXIS, PC-SEEP, SEEP/W) Model numerik (SEEP2D, PC SEEP)
4	Urugan zonal dengan fondasi porous, aliran langgeng 2D	Garis freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas) Gradien keluaran dan debit rembesan. Alternatif sistem pengendalian dan variasi parameter material	Model numerik (SEEP2D, PC SEEP, SEEP/W)
5	Aliran transien 2D, kondisi batas tetap	Proses penjenjutan dan waktu sampai terjadi aliran tetap	Model numerik (PC-SEEP, SEEP/W)
6	Situasi termasuk aliran 2D tidak langgeng, jenuh – tidak jenuh, urugan zonal dan homogen, fondasi heterogen, kondisi batas transien.	Pengisian pertama, operasi waduk, perubahan kadar air dan tekanan air pori, pengaruh presipitasi dan evaporasi	Model numerik (PC-SEEP, SEEP/W)

6.2 Metode analisis

a) Metode numerik

Metode numerik dengan komputer sangat dianjurkan untuk digunakan dalam analisis rembesan air karena beberapa keuntungan yaitu sebagai berikut.

- 1) Sistem yang kompleks dapat dianalisis dengan mudah.
- 2) Tidak perlu ada transformasi dimensi akibat pengaruh sifat material.

- 3) Hasil yang dikeluarkan berupa nilai digital pada setiap titik nodal, yang kemudian dapat digambarkan garis ekipotensial dan tekanan air pori.
- 4) Parameter tanah dapat divariasikan dengan mudah.

Program-program komputer yang banyak digunakan dapat dibedakan atas dua jenis, yaitu sebagai berikut :

- 1) Elemen hingga (*finite element*)
 - (a) Program SEEP2D dikembangkan DUNCAN, J.M dan WONG, K.S dari Virginia Polytechnic Institute, hanya dapat digunakan untuk aliran langgeng.
 - (b) Program PLAXIS dari Belanda, hanya dapat digunakan untuk aliran langgeng.
 - (c) Program PC-SEEP/SEEP-W dari Geo-Slope Programming Ltd (1987), Calgary Alberta, Canada dapat digunakan untuk aliran langgeng dan aliran transien (*transien flow*).
- 2) Elemen batas (*bundary element*)
Program BIE2DCP dikembangkan di US Bureau of Reclamation dan hanya digunakan untuk aliran langgeng.

b) Metode persamaan dan grafis

Berdasarkan teori rembesan jenuh air dan kondisi yang disederhanakan, metode ini dapat digunakan sebagai analisis pendahuluan dalam desain dan perkiraan biaya. Bila penyederhanaan ini dapat diterima melalui penyelidikan yang terperinci, cara ini dapat digunakan untuk desain final. Semua metode analisis didasarkan pada persamaan Darcy yaitu:

$$q = k.i.A \quad (8)$$

Keterangan :

- q adalah debit rembesan (m³/s);
i adalah gradien hidraulik (tanpa dimensi);
A adalah luas potongan yang ditinjau (m²);
k adalah koefisien permeabilitas (m/s).

Selain itu, gaya rembesan (F_s) untuk analisis stabilitas dan deformasi dapat dihitung untuk kondisi jenuh dengan persamaan:

$$F_s = \gamma_w i V \quad (9)$$

Keterangan :

- F_s adalah gaya rembesan (ton)
 γ_w adalah berat volume air (ton/m³)
V adalah volume (m³)

Persamaan-persamaan, grafik-grafik dan gambar-gambar pada Lampiran B dapat digunakan untuk analisis pendahuluan dan final dalam desain sistem pengendalian rembesan air. Misalnya sumur pelepas tekanan, parit drainase, selimut kedap air, berm hilir, dan dinding halang. Namun dalam penggunaannya, hal itu harus dilakukan secara hati-hati. Sebagai contoh, metode tersebut tidak berlaku bila digunakan kombinasi beberapa sistem pengendalian rembesan air yang merupakan satu kesatuan.

c) Metode grafis

- 1) Garis freatik untuk kondisi aliran langgeng dapat diperkirakan secara semi grafis menggunakan prosedur yang diberikan pada Gambar C.1, C.2 dan C.3 dari Lampiran C. Hasilnya dapat digunakan untuk memperkirakan tekanan air pori dalam analisis stabilitas lereng bendungan, sebagai acuan untuk penempatan pisometer, atau pembandingan dengan data yang terbaca dari instrumen.

2) Cara jaring alir merupakan cara grafis untuk menggambarkan tinggi potensial hidrolik dan arah aliran dalam 2 dimensi, khususnya aliran langgeng yang jenuh air. Cara ini berguna untuk memperkirakan tekanan air pori, gradien hidrolik, dan debit rembesan. Namun, jaring alir hanya dapat digunakan untuk permasalahan yang sederhana, seperti sistem satu atau dua zona bahan dengan parameter yang tidak bisa divariasikan. Dasar-dasar pembuatan jaring alir dapat diperiksa pada Lampiran C.4 dari Lampiran C. Contoh-contoh hasil pembuatan jaring alir dapat diperiksa pada Gambar C.5 sampai C.8.

d) Metode tahanan listrik

Metode ini dapat digunakan karena ada kesamaan antara hukum Ohm dan hukum Darcy. Media tanah dapat disesuaikan dengan tahanan-tahanan listrik yang dialiri arus listrik. Voltase yang terukur pada tiap titik simpul dapat diidentikkan sebagai tinggi tekanan air. Metode ini dapat digunakan untuk aliran langgeng. Namun, karena membutuhkan banyak resistor untuk membuat model media aliran, pelaksanaannya menjadi kurang praktis.

6.3 Kondisi muka air waduk sebagai pembebanan

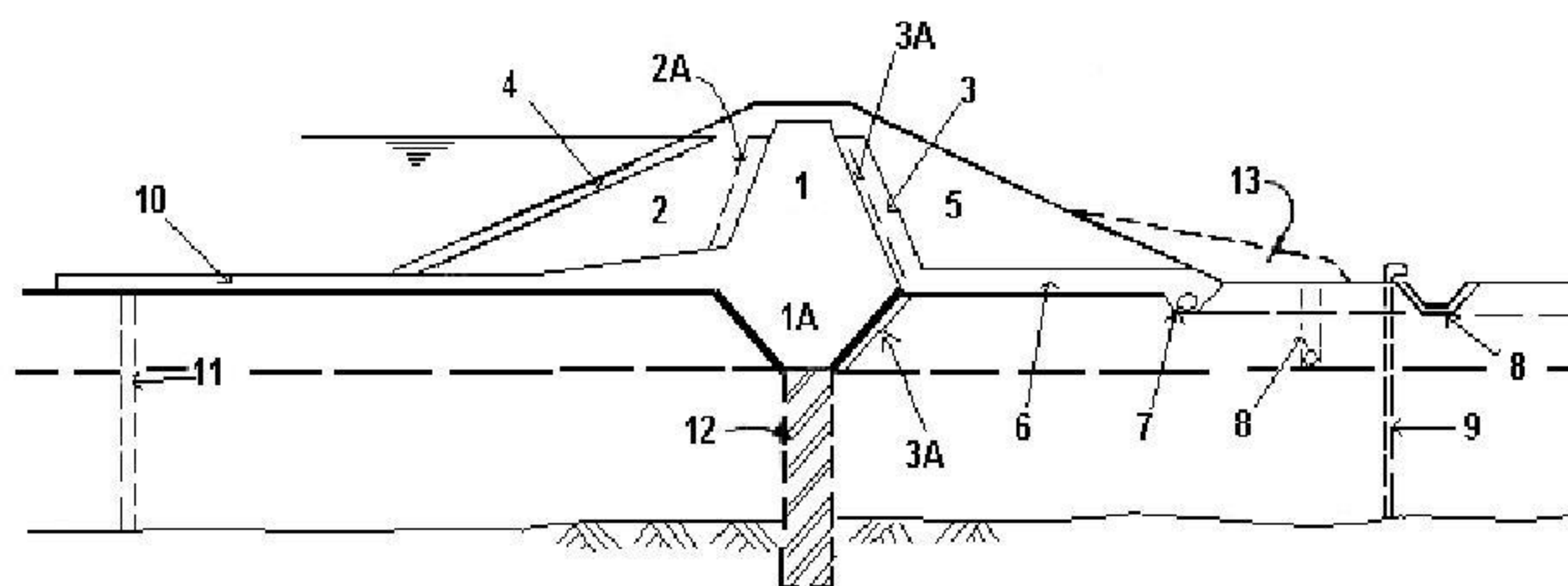
Kondisi muka air waduk sebagai pembebanan dalam analisis, harus memperhitungkan hal berikut ini.

- a) Elevasi muka air maksimum harus digunakan untuk menentukan pengaruh gradien keluaran dan tekanan angkat pada fondasi porus. Bila fondasi sudah jenuh, perubahan tekanan air dapat terjadi dalam waktu singkat. Kapasitas maksimum pada kondisi muka air waduk maksimum juga harus digunakan untuk desain sistem drainase yang terpengaruh oleh fondasi porus.
- b) Elevasi muka air normal harus digunakan untuk memperkirakan debit rembesan, dan untuk menentukan garis freatik pada kondisi aliran langgeng. Pada umumnya elevasi ini merupakan elevasi maksimum yang digunakan untuk menentukan kapasitas maksimum untuk kebutuhan air (konservasi air).
- c) Elevasi muka air waduk minimum atau disebut juga sebagai elevasi muka air konservasi inaktif harus digunakan untuk studi retak susut di dalam tubuh bendungan, bila terjadi dalam jangka panjang. Kriteria ini dapat digunakan, kecuali jika ada kriteria lain yang harus diperhitungkan.
- d) Elevasi muka air hilir rata-rata harus digunakan untuk studi aliran langgeng.
- e) Hidrograf untuk di waduk dan di hilir bendungan, dapat dikembangkan dari kriteria operasi waduk untuk studi pengaruh aliran transien, yaitu :
 - 1) pengisian pertama waduk;
 - 2) perubahan muka air tahunan waduk; dan
 - 3) siklik banjir.

7 Pengendalian rembesan air dan pertimbangan desain

Filosofi dasar pengendalian rembesan yang digunakan oleh berbagai instansi di luar negeri secara bertahap adalah untuk memperoleh keamanan dan kemampuan penyimpanan air dalam waduk. Pengendalian rembesan air secara bertahap sangat dibutuhkan karena banyak faktor yang belum diketahui pada tahap desain sampai masa guna bendungan, antara lain:

- a) anomali geologi dan keterbatasan data penyelidikan;
- b) asumsi yang tidak sesuai dengan kejadian gempa dan cuaca;
- c) penurunan fungsi dari satu atau beberapa sistem pengendalian rembesan dengan waktu;
- d) perubahan cara pengoperasian waduk;
- e) peningkatan populasi di sekitar lokasi.



Keterangan gambar:

1	Zona penahan air (inti)	6	Selimut drainase
1A	Parit halang	7	Drainase kaki (<i>toe drain</i>)
2	Zona drainase udik untuk pelindung stabilitas	8	Parit drainase (terbuka atau tertutup)
2A	Zona transisi	9	Sumur pelepas tekanan (<i>relief wells</i>)
3	Zona drainase hilir (<i>chimney drain</i>)	10	Selimut kedap air
3A	Subzona saringan (<i>filter</i>)	11	Dinding halang slurry (<i>Slurry wall cutoff</i>)
4	Zona armor	12	<i>Grouting</i> tirai
5	Zona pelindung stabilitas hilir	13	Berm rembes air

Gambar 1 - Pengontrolan rembesan air pada bendungan tipe urugan

Sistem pengendalian rembesan air dibagi dalam dua kategori, yaitu cara dinding penahan air dan cara pengontrolan drainase. Desain bendungan biasanya menggunakan kombinasi dari kedua cara tersebut. Walaupun prinsip kerja kedua cara tersebut berbeda, dalam analisis rembesan air, kedua cara itu harus digabung sebagai satu kesatuan.

Pada Gambar 1, diperlihatkan sketsa beberapa sistem pengontrolan rembesan air dalam satu gambar dan diuraikan secara terperinci seperti berikut ini.

7.1 Sistem pengendalian rembesan pada urugan

7.1.1 Zona urugan

Zona urugan biasanya terdiri atas zona penahan air (inti kedap air) yang dilindungi oleh drainase saring (*filter*) dan zona pelindung untuk stabilitas. Untuk mengendalikan rembesan air, dapat dipilih salah satu alternatif atau kombinasi dari beberapa alternatif berikut ini.

- Parit halang (*cutoff trench*) biasanya merupakan bagian dari inti kedap air yang dibuat pada lapisan fondasi yang porus, dan bila memungkinkan secara ekonomis, mencapai kedalaman fondasi yang kedap air. Desain bidang kontak antara inti dan fondasi dianjurkan cukup panjang, untuk mengurangi gradien hidraulik di sepanjang bidang kontak. Sebagai contoh, pada potongan bendungan dekat ebatmen, lereng inti kedap air harus dibuat lebih landai. Masuknya aliran air karena perubahan geometri pada permukaan hilir inti kedap air harus dicegah untuk mengurangi rembesan.
- Zona drainase hilir (*chimney drain*) harus dilengkapi dengan subzona saring (*filter*) terhadap material inti kedap air dan subzona campuran pasir dan kerikil yang porus, yang memenuhi persyaratan. Zona drainase hilir (*chimney drain*) harus mempunyai kapasitas yang cukup dan ditempatkan cukup tinggi untuk mengatasi kondisi aliran darurat yang mungkin terjadi, sebagai contoh bila ada retakan pada inti kedap air pada waktu muka air waduk maksimum.
- Zona drainase udik dan zona pelindung stabilitas biasanya menggunakan material yang nonkohesif dan mempunyai sifat disipasi air yang tinggi waktu surut cepat.

7.1.2 Selimut drainase

Selimut drainase (*drainage blanket*), biasanya merupakan perpanjangan dari drainase hilir dalam arah horizontal, yang dihubungkan dengan drainase kaki (*toe drain*). Material yang digunakan harus memenuhi syarat filter. Bila material bagian atas dan bawah mempunyai kemungkinan terjadinya perpindahan partikel halus ke dalam material drainase maka selimut drainase harus didesain agar dapat menampung debit air dari zona drainase hilir, fondasi dan rembesan air hujan.

Koefisien permeabilitas material selimut drainase dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (4).

7.2 Sistem pengendalian rembesan pada fondasi

7.2.1 Parit drainase hilir

Parit drainase hilir yang dibuat sejajar dengan kaki bendungan dapat digunakan sebagai drainase untuk rembesan fondasi yang dibutuhkan pada lokasi yang rendah. Parit tersebut harus didesain dengan memberi lining dari material bergradasi sesuai dengan syarat filter, dan ditutup dengan material riprap sebagai bahan pelindung terhadap erosi.

7.2.2 Sumur pelepas tekanan

Sumur pelepas tekanan (*relief well*) berfungsi untuk mengurangi tekanan artesis dalam akuifer terkekang dengan aman, karena pengaruh tekanan angkat dan atau gradien keluaran melewati lapisan terkekang di hilir bendungan. Bila sumur ini berfungsi sebagai drainase dari formasi berbutir kasar, material yang digunakan di sekeliling saringan harus memenuhi syarat filter.

7.2.3 Selimut kedap air

Bila fondasi berupa material sangat porus, harus digunakan selimut kedap air di udik sebagai kelanjutan horizontal dari dinding halang bendungan (inti). Selimut ini berfungsi untuk menurunkan gradien rembesan atau jumlah rembesan akibat adanya beda tinggi muka air waduk dan muka air hilir (*head*). Gradien yang tinggi sering terjadi pada potongan tebal selimut, yang mengakibatkan terjadinya erosi buluh dari material selimut ke dalam material fondasi. Untuk mencegah hal ini, perlu dipasang lapisan filter yang memenuhi syarat filter di bawah selimut. Lapisan selimut harus dibuat lebih tebal di daerah sambungan dengan inti bendungan, agar tahan terhadap bahaya erosi buluh dan bobolnya bendungan, yang garis alirannya terpendek. Pada Lampiran Gambar B.5, diperlihatkan cara memperkirakan efektivitas selimut kedap air di udik.

7.2.4 Dinding halang slari (*slurry*)

Dinding halang slari adalah dinding halang yang sangat efektif untuk mencegah rembesan air masuk melewati fondasi bendungan. Hal ini digunakan bila dinding halang yang berupa parit tidak ekonomis untuk mencapai lapisan fondasi kedap air. Desain bendungan harus memperhitungkan pengaruh gradien hidraulik pada bidang kontak antara inti bendungan dan dinding halang slari, agar penempatan dinding cukup baik. Penempatan dinding halang di udik bendungan, seperti terlihat pada Gambar B.4 pada Lampiran B dapat digunakan untuk memperkirakan efektivitas kedalaman dinding halang.

7.2.5 Dinding diafragma

Dinding diafragma sebagai dinding halang biasanya terbuat dari beton, tetapi kadang-kadang menggunakan proses bahan dan alat yang dipatenkan. Cara ini sangat efektif sebagai dinding halang air melewati tubuh dan fondasi bendungan.

7.2.6 Injeksi (*grouting*) tirai

Injeksi berupa tirai dapat digunakan untuk mengurangi rembesan, tetapi sebagai dinding halang air tingkat efektivitasnya tergantung pada kondisi geologi. Pada umumnya injeksi tirai hanya berfungsi untuk mengurangi aliran rembesan total melewati fondasi. Namun, injeksi tirai tidak berfungsi untuk memperpanjang garis aliran karena suatu bukaan kecil pada tirai akan menimbulkan garis aliran memendek. Tipe campuran injeksi yang sering digunakan adalah injeksi semen, yang hanya efektif digunakan pada lapisan berbutir kasar atau formasi batuan yang mengandung banyak rekahan. Injeksi bahan kimia juga sering digunakan pada lapisan fondasi berbutir halus. Gambar B.5 dari Lampiran B, dapat digunakan untuk memperkirakan efektivitas kedalaman dinding halang.

7.2.7 Perbaikan bidang kontak

Perbaikan bidang kontak antara urugan dan fondasi bendungan tipe urugan yang dibangun di atas fondasi batuan harus dilakukan sesuai dengan standar yang berlaku.

7.2.8 *Berm* rembes air di hilir

Berm rembes air di hilir adalah konstruksi yang efektif untuk melawan gradien keluaran yang tinggi atau tekanan angkat yang tinggi pada kaki hilir bendungan. Bila gradien keluaran merupakan masalah utama, maka material *berm* harus dibuat dari bahan yang lebih porus dibandingkan material dibawahnya. Material *berm* ini berfungsi sebagai filter, sistem drainase dan beban penggimbang (*counterweight*).

7.2.9 Galeri (terowong drainase)

Galeri merupakan serangkaian lubang drainase yang dibor, yang kadang-kadang diperlukan untuk mengurangi tekanan air pori dalam batuan di *ebatmen*, dan memindahkan aliran rembesan dari bidang kontak antara tubuh dan fondasi bendungan.

7.2.10 Pengeboran drainase semihorizontal

Pengeboran drainase semihorizontal dapat dibuat ke dalam *ebatmen* bendungan untuk mengurangi tekanan air pori berlebih atau menahan rembesan sebelum mencapai bendungan.

Lampiran A
(informatif)
Sifat teknis material tanah dan batu

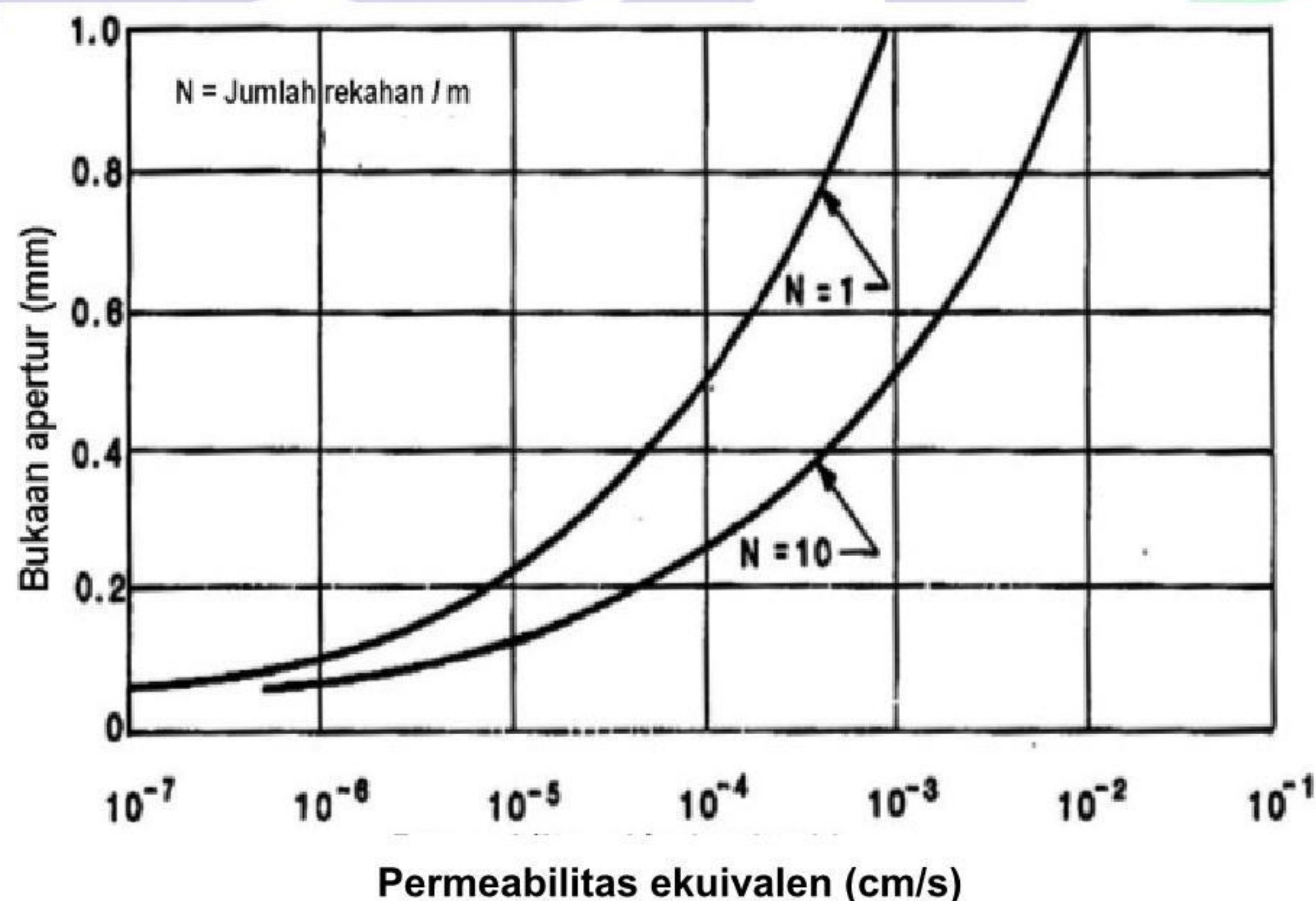
(Bahan diambil dari *United States Bureau of Reclamation, Design Standards, Embankment Dams No. 13, Chapter 8, Seepage Analysis and Control*)

Gambar

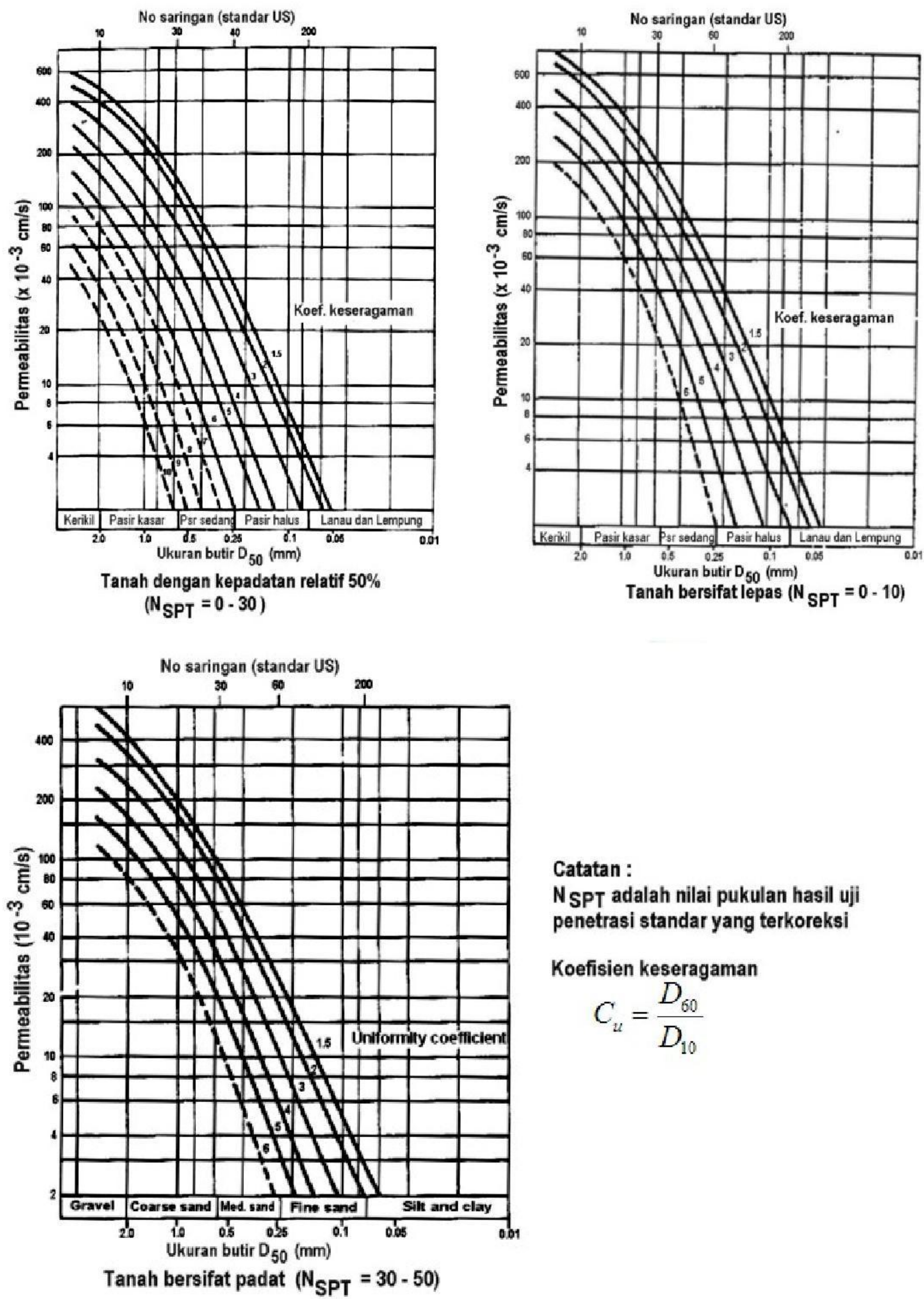
- A.1 Koefisien permeabilitas ekuivalen dari susunan rekahan paralel yang sederhana
- A.2 Koefisien permeabilitas dari tanah nonkohesif berdasarkan ukuran butir, keseragaman dan kepadatan (*density*)
- A.3 Koefisien permeabilitas untuk berbagai kelas material geologi
- A.4 Hubungan antara porositas dan *specific yield*
- A.5 Daya isap (*suction*) tanah nonkohesif dan kohesif
- A.6 Hubungan antara koefisien permeabilitas relatif dan kadar air

Tabel

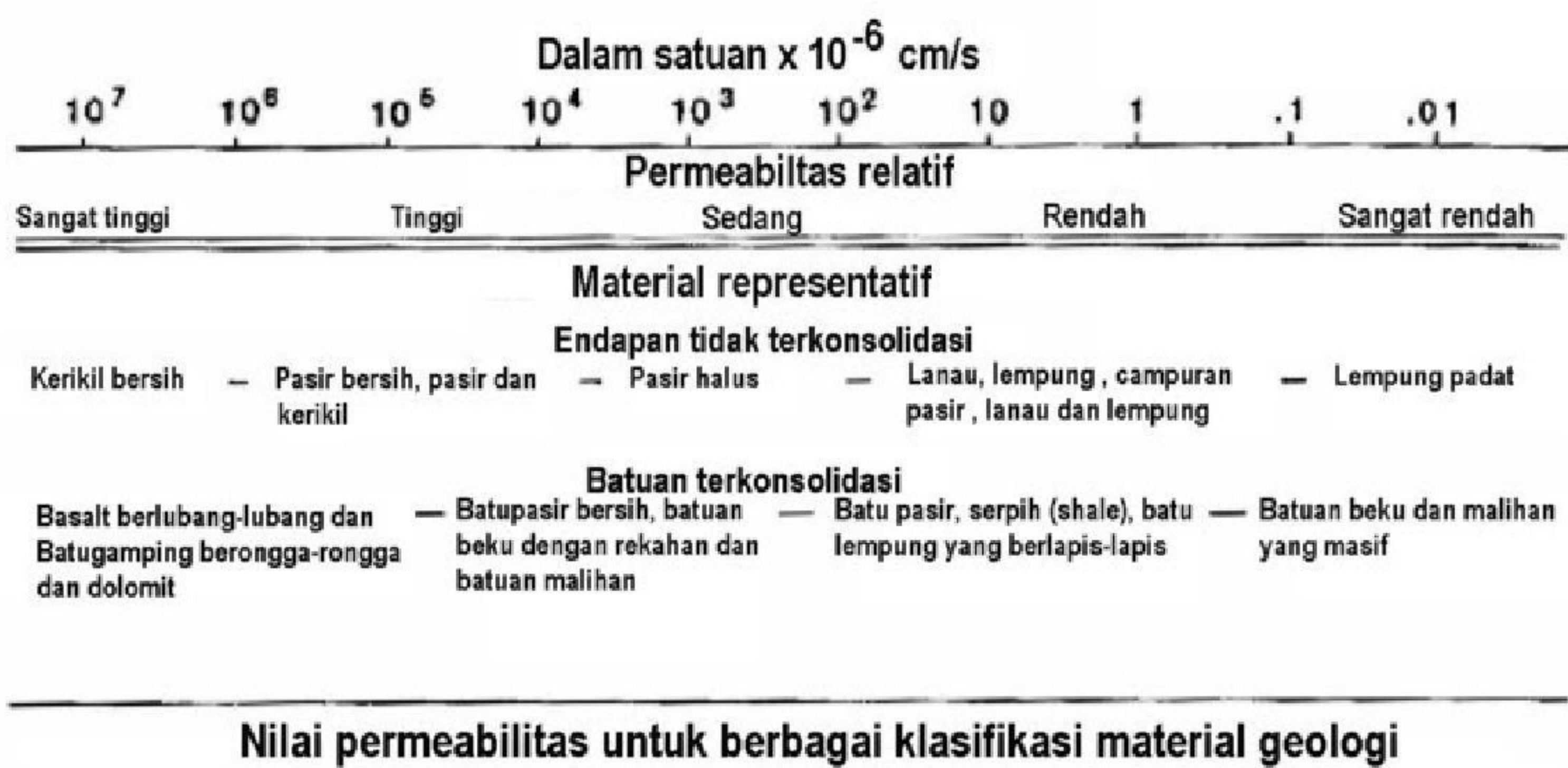
- A.1 Permeabilitas material inti bendungan
- A.2 Permeabilitas material pelindung stabilitas bendungan tipe urugan
- A.3 Permeabilitas material drainase bendungan tipe urugan
- A.4 Anisotropi material bendungan tipe urugan
- A.5 Permeabilitas tanah alami takterkonsolidasi
- A.6 Permeabilitas batuan tanpa rekahan
- A.7 Anisotropi tanah alami dan batuan asli
- A.8 Porositas tanah urugan
- A.9 Porositas tanah alami takterkonsolidasi
- A.10 Porositas batuan



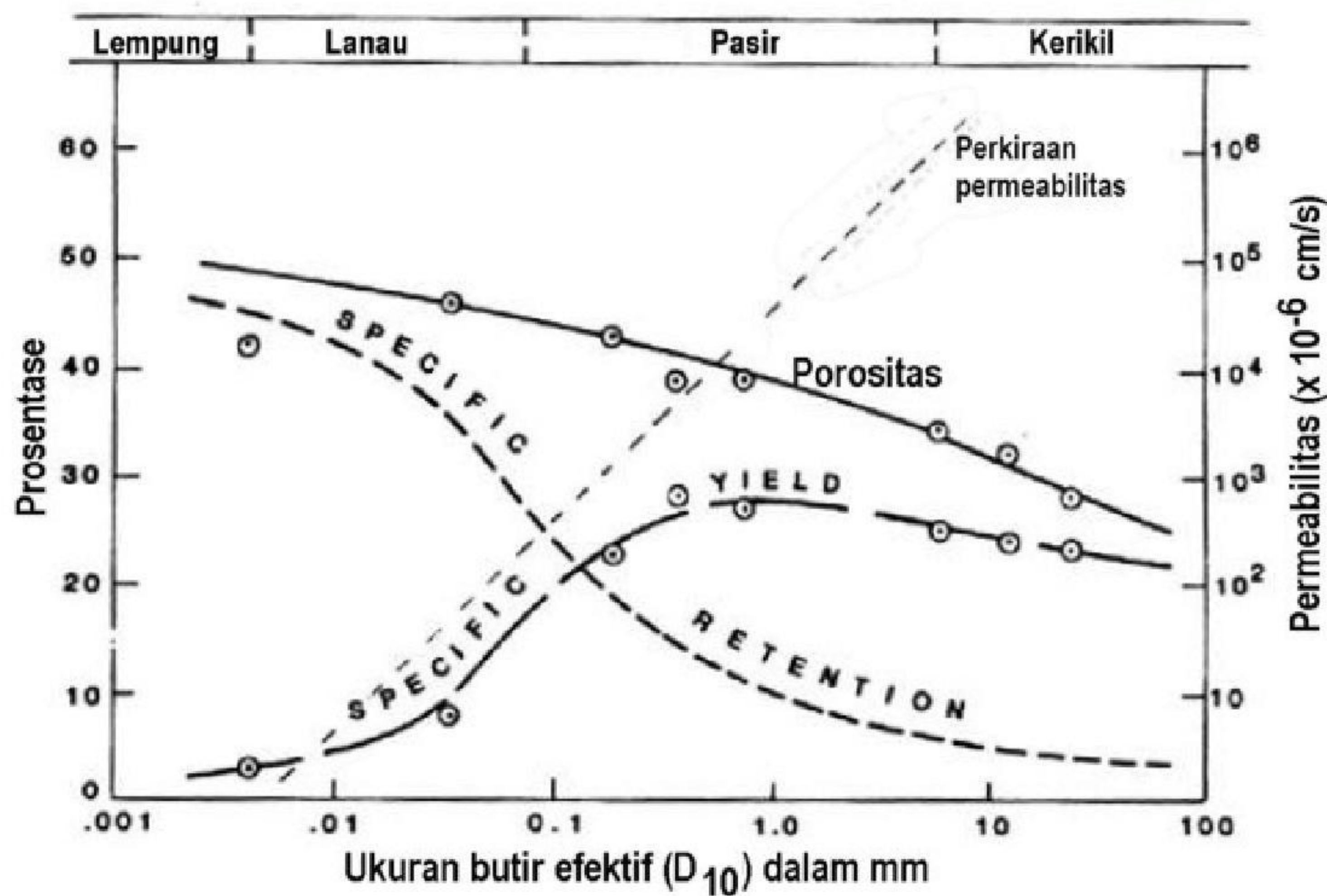
Gambar A.1 - Koefisien permeabilitas ekuivalen dari susunan rekahan paralel yang sederhana



Gambar A.2 - Koefisien permeabilitas tanah non kohesif berdasarkan ukuran butir, keseragaman, dan kepadatan



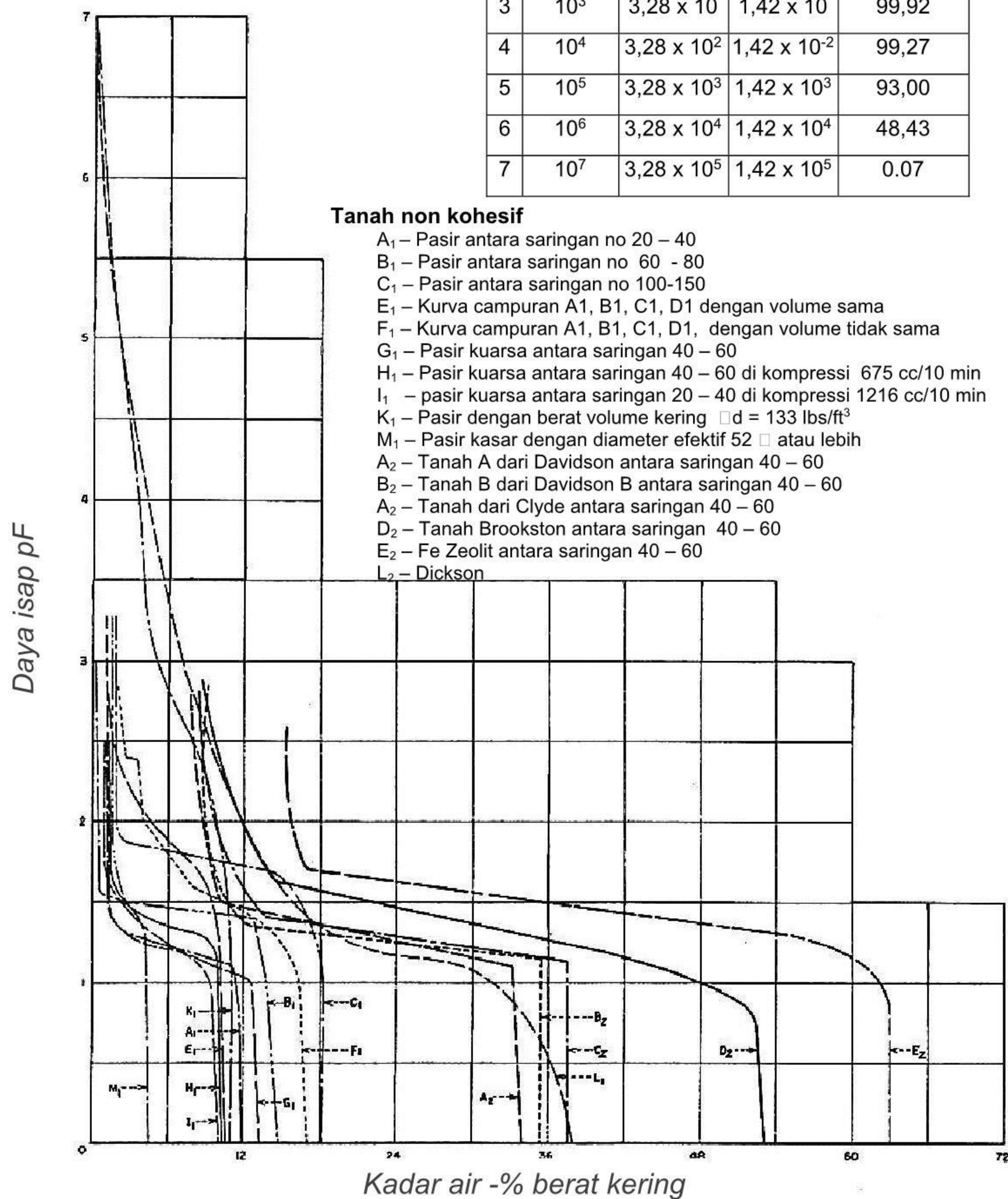
Gambar A.3 - Koefisien permeabilitas untuk berbagai kelas material geologi



Gambar A.4 - Hubungan antara porositas dan *specific yield*

Tabel konversi satuan

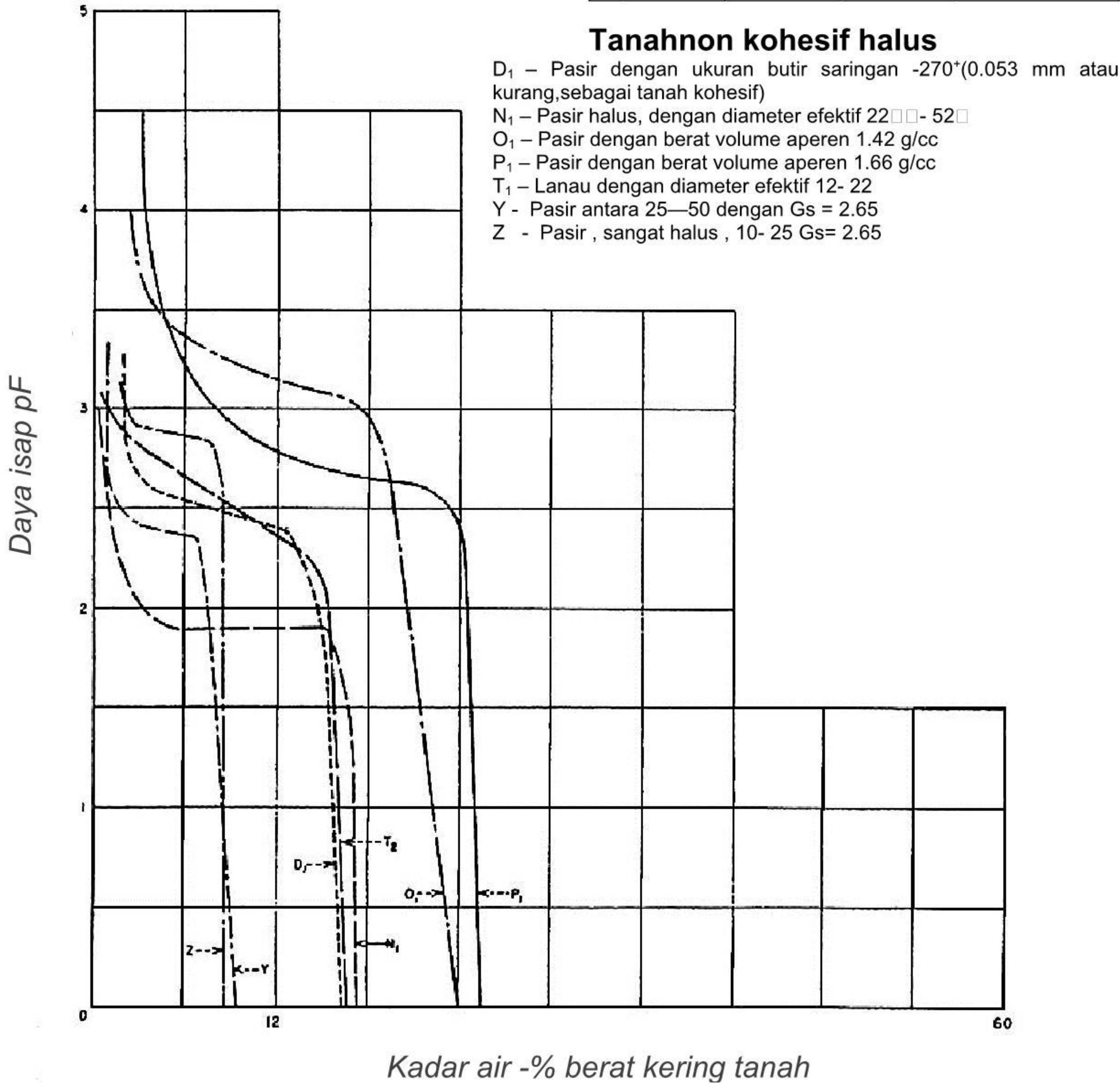
pF	Tekanan negatif ekuivalen		Daya isap (lbs/sq in)	Kelembaban relatif (Persen)
	cm - H ₂ O	Ft - H ₂ O		
0	1	$3,28 \times 10^{-2}$	$1,42 \times 10^{-2}$	
1	10	$3,28 \times 10^{-2}$	$1,42 \times 10^{-1}$	
2	10^2	3.28	1.42	99,99
3	10^3	$3,28 \times 10$	$1,42 \times 10$	99,92
4	10^4	$3,28 \times 10^2$	$1,42 \times 10^{-2}$	99,27
5	10^5	$3,28 \times 10^3$	$1,42 \times 10^3$	93,00
6	10^6	$3,28 \times 10^4$	$1,42 \times 10^4$	48,43
7	10^7	$3,28 \times 10^5$	$1,42 \times 10^5$	0.07



A.5a - Daya isap (suction) tanah untuk tanah nonkohesif

Tabel konversi satuan

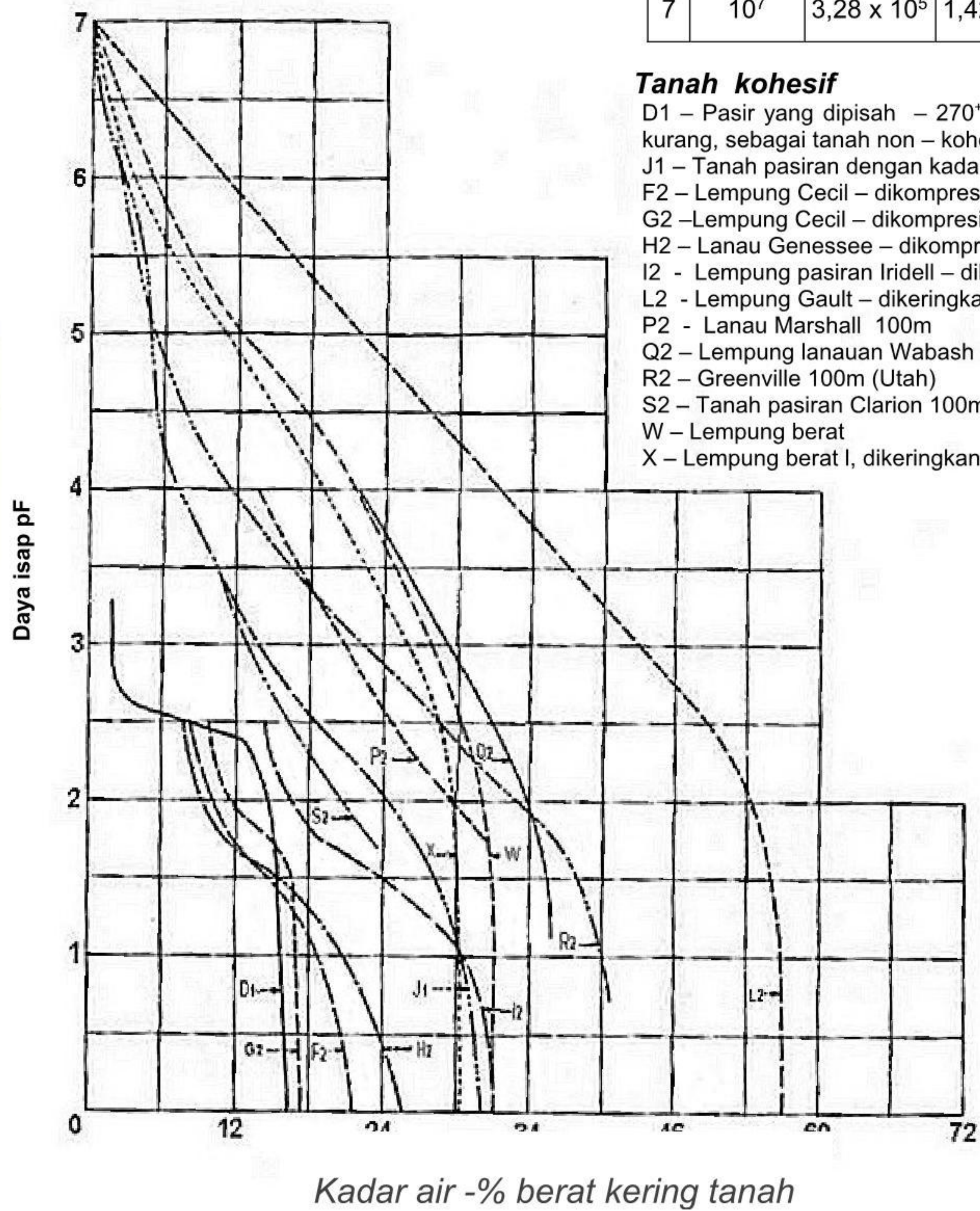
pF	Tekanan negatif ekuivalen		Daya isap (lbs/sq in)	Kelembaban relatif (Persen)
	cm - H ₂ O	ft - H ₂ O		
0	1	3,28 x 10 ⁻²	1,42 x 10 ⁻²	
1	10	3,28 x 10 ⁻²	1,42 x 10 ⁻¹	
2	10 ²	3.28	1.42	99,99
3	10 ³	3,28 x 10	1,42 x 10	99,92
4	10 ⁴	3,28 x 10 ²	1,42 x 10 ⁻²	99,27
5	10 ⁵	3,28 x 10 ³	1,42 x 10 ³	93,00
6	10 ⁶	3,28 x 10 ⁴	1,42 x 10 ⁴	48,43
7	10 ⁷	3,28 x 10 ⁵	1,42 x 10 ⁵	0,07



Gambar A.5b - Daya isap tanah nonkohesif halus

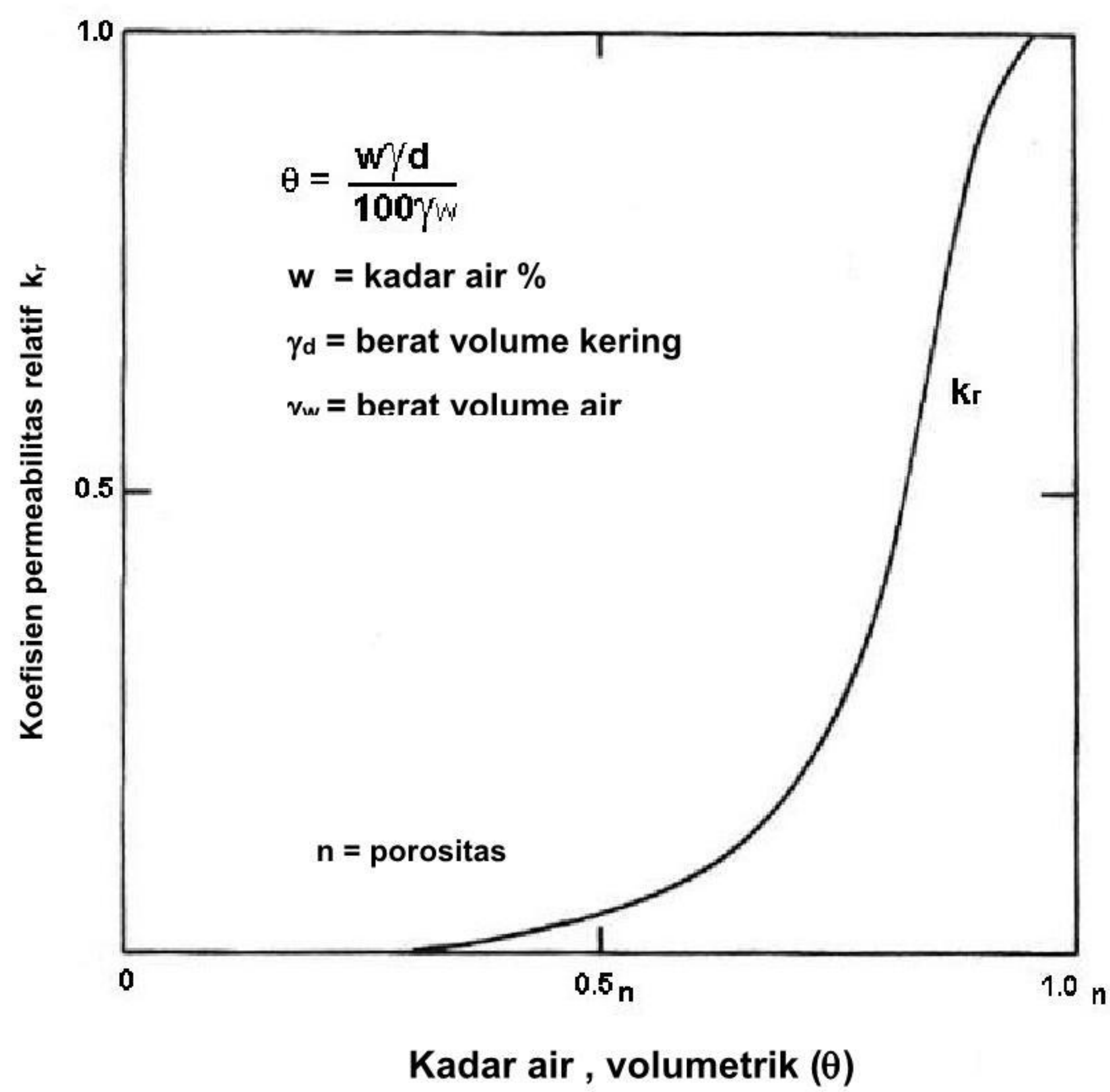
Tabel konversi satuan

pF	Tekanan negatif ekuivalen		Daya isap (lbs/sq in)	Kelembaban relatif (Persen)
	cm - H ₂ O	ft - H ₂ O		
0	1	3,28 x 10 ⁻²	1,42 x 10 ⁻²	
1	10	3,28 x 10 ⁻²	1,42 x 10 ⁻¹	
2	10 ²	3.28	1.42	99,99
3	10 ³	3,28 x 10	1,42 x 10	99,92
4	10 ⁴	3,28 x 10 ²	1,42 x 10 ⁻²	99,27
5	10 ⁵	3,28 x 10 ³	1,42 x 10 ³	93,00
6	10 ⁶	3,28 x 10 ⁴	1,42 x 10 ⁴	48,43
7	10 ⁷	3,28 x 10 ⁵	1,42 x 10 ⁵	0,07



Tanah kohesif
D1 – Pasir yang dipisah – 270+ mesh (0.053 mm atau kurang, sebagai tanah non – kohesif juga)
J1 – Tanah pasiran dengan kadar lempung kecil
F2 – Lempung Cecil – dikompresi 127 cc/10 min
G2 –Lempung Cecil – dikompresi 6 cc/10 min
H2 – Lanau Genessee – dikompresi 205 cc/10 min
I2 - Lempung pasiran Iridell – dikomp. 36 cc/10 min
L2 - Lempung Gault – dikeringkan kondisi asli
P2 - Lanau Marshall 100m
Q2 – Lempung lanauan Wabash
R2 – Greenville 100m (Utah)
S2 – Tanah pasiran Clarion 100m
W – Lempung berat
X – Lempung berat I, dikeringkan

Gambar A-5c - Daya isap tanah kohesif



Gambar A.6 - Hubungan antara koefisien permeabilitas relatif dan kadar air, volumetrik

Tabel A.1 Permeabilitas (k_v) material inti bendungan (k_v disesuaikan dengan % butiran halus)

USCS	** k_v batasan ($\times 10^{-6}$ cm/s)
GM – SM	0,0 s.d. 10,0
GM or GC	0,0 s.d. 10,0
SP – SM	0,0 s.d. 10,0
SM	0,0 s.d. 10,0
SM – SC	0,0 s.d. 3,0
SM – ML	0,0 s.d. 10,0
SC	0,0 s.d. 3,0
ML	0,0 s.d. 10,0
ML – CL	0,0 s.d. 1,0
CL	0,0 s.d. 1,0
MH	0,0 s.d. 0,1
CH	0,0 s.d. 0,1
Bibliografi : [8.9]	

Tabel A.2 Permeabilitas (k_v) material pelindung stabilitas bagian luar (*shell*) bendungan (k_v disesuaikan dengan % butiran halus)

USCS	k_v batasan ($\times 10^{-6}$ cm/s)
GP	2,000 s.d. 1,000,000
GW	1,000 s.d. 100,000
GP - SP	1,000 s.d. 50,000
GW - SW	500 s.d. 5,000
GM	10 s.d. 500
SP (m. s.d. c.)	10,000 s.d. 20,000
SP (f. s.d. m.)	5,000 s.d. 10,000
SP (v.f. s.d. f.)	500 s.d. 5,000
SW	300 s.d. 5,000
SP – SM	10 s.d. 1,000
SM	10 s.d. 500
Bibliografi : [8.9]	

Tabel A.3 Permeabilitas (k_v) material drainase bendungan (k_v meningkat sesuai dengan peningkatan ukuran butir)

Material	k_v batasan ($\times 10^{-6}$ cm/s)
Pasir kasar dan kerikil	150,000 s.d. 500,000
Pasir kasar dan medium	50,000 s.d. 150,000
Pasir halus dan medium	10,000 s.d. 50,000
Bibliografi : [8.9]	

Tabel A.4 Anisotropi (k_h/k_v) material bendungan (k_h/k_v meningkat dengan peningkatan kadar air pemadatan)

Material	Batasan k_h/k_v
Inti bendungan Standar pemadatan USBR	4 s.d. 9
Tanpa standar pemadatan	9 s.d. 36
Isian hidrolik (<i>Hydraulic Fill</i>)	64 s.d. 225
Zona pelindung stabilitas bendungan urugan Standar USBR	4 s.d. 9
Zona drainase bendungan urugan standar USBR	1 s.d. 4
Bibliografi : [8.9]	

** Tabel A.1 berdasarkan pada data uji laboratorium

Tabel A.5 Permeabilitas (k_h) tanah alami tak terkonsolidasi (k_h disesuaikan dengan % butiran halus)

Tanah	k_h batasan ($\times 10^{-6}$ cm/s)
Kerikil , pekerjaan terbuka	> 2,000,000
Kerikil pasiran (GP)	200,000 s.d. 2,000,000
Kerikil (GW)	10,000 s.d. 1,000,000
Pasir , kasar (SP)	10,000 s.d. 500,000
Pasir, sedang (SP)	1,000 s.d. 100,000
Pasir, halus (SP)	500 s.d. 50,000
Pasir (SW)	100 s.d. 50,000
Pasir, Lanauan (SM)	100 s.d. 10,000
Pasir , lempungan (SC)	100 s.d. 1,000
Lanau Silt (ML)	10 s.d. 1,000
Lempung Clay (CL)	0 s.d. 3
Bibliografi : [8.9]	

Tabel A.6 Permeabilitas (k_h) batuan tanpa rekahan (k_h disesuaikan dengan % ukuran butir)

Batuan	Batasan k_h ($\times 10^{-6}$ cm/s)
Batu pasir, sedang	100 s.d. 200,000
Batu pasir, lanauan	0 s.d. 5,000
Batu kapur	0 s.d. 15,000
Gambut	0 s.d. 15,000
Granit lapuk	200 s.d. 10,000
Schist	0 s.d. 2,000
Tuff	0 s.d. 1,000
Gabbro, lapuk	50 s.d. 500
Basalt	0 s.d. 50
Dolomit	0 s.d. 5
Gneiss	0 s.d. 2
Bibliografi : [8.9]	

Tabel A.7 Anisotropi tanah alami dan batuan asli

Formasi	k_h/k_v	Catatan
Endapan berlapis	10 s.d. 1,000	k_h/k_v tergantung ukuran butiran dari peralapisan
Tanah dan batuan masif	1 s.d. 3	k_h/k_v tergantung bentuk dan orientasi butir
Batuan dengan rekahan	0,1 s.d. 10	k_h/k_v tergantung besar bukaan
Tanah Eolian (loess & dune)	0,02 s.d. 2	k_h/k_v tergantung konsolidasi
Bibliografi : [8.9]		

Tabel A.8 Porositas (n) tanah urugan
(n meningkat dengan keseragaman)

USCS	Batas porositas, n
GP	0,25 s.d. 0,35
GW	0,20 s.d. 0,30
GM	0,20 s.d. 0,35
GM – SM	0,20 s.d. 0,25
GC	0,25 s.d. 0,35
GC – SC	0,20 s.d. 0,30
SP	0,25 s.d. 0,35
SW	0,20 s.d. 0,30
SM	0,25 s.d. 0,35
SM - ML	0,25 s.d. 0,35
SM - SC	0,25 s.d. 0,35
SC	0,20 s.d. 0,30
ML	0,30 s.d. 0,40
ML - CL	0,25 s.d. 0,40
CL	0,25 s.d. 0,40
CH	0,35 s.d. 0,50
Bibliografi : [8.9]	

Tabel A.9 Porositas (n) tanah alami tak
terkonsolidasi (n disesuaikan dengan
kepadatan)

Tanah	Batas porositas, n
Kerikil kasar	0,25 s.d. 0,40
Kerikil sedang	0,25 s.d. 0,45
Kerikil halus	0,25 s.d. 0,45
Pasir kasar	0,25 s.d. 0,45
Pasir sedang	0,25 s.d. 0,50
Pasir halus	0,25 s.d. 0,50
Pasir halus	0,25 s.d. 0,50
Pasir till	0,20 s.d. 0,35
Pasir dune	0,40 s.d. 0,50
Lanau	0,30 s.d. 0,60
Lanau , till	0,30 s.d. 0,40
Loess	0,45 s.d. 0,60
Lempung	0,35 s.d. 0,80
Bibliografi : [8.9]	

Tabel A.10 Porositas (n) batuan
(Batasan disesuaikan dengan ukuran butir, sementasi, pelapukan)

Batuan	Porositas , n		Batuan	Porositas , n
<i>Shale</i>	0,01 s.d. 0,10		Basalt	0,03 s.d. 0,35
Batu lempung	0,40 s.d. 0,45		Batu pasir halus	0,01 s.d. 0,50
Batu lanau	0,20 s.d. 0,40		Batu pasir sedang	0,30 s.d. 0,45
Tuff	0,07 s.d. 0,55		Gabbro (lapuk)	0,35 s.d. 0,45
<i>Schist</i>	0,04 s.d. 0,50		Granit, lapuk	0,35 s.d. 0,55
Dolomit	0,20 s.d. 0,35		<i>Most other</i>	< 0.01
Batu kapur	0,07 s.d. 0,55			
Bibliografi : [8.9]				

Lampiran B (informatif)

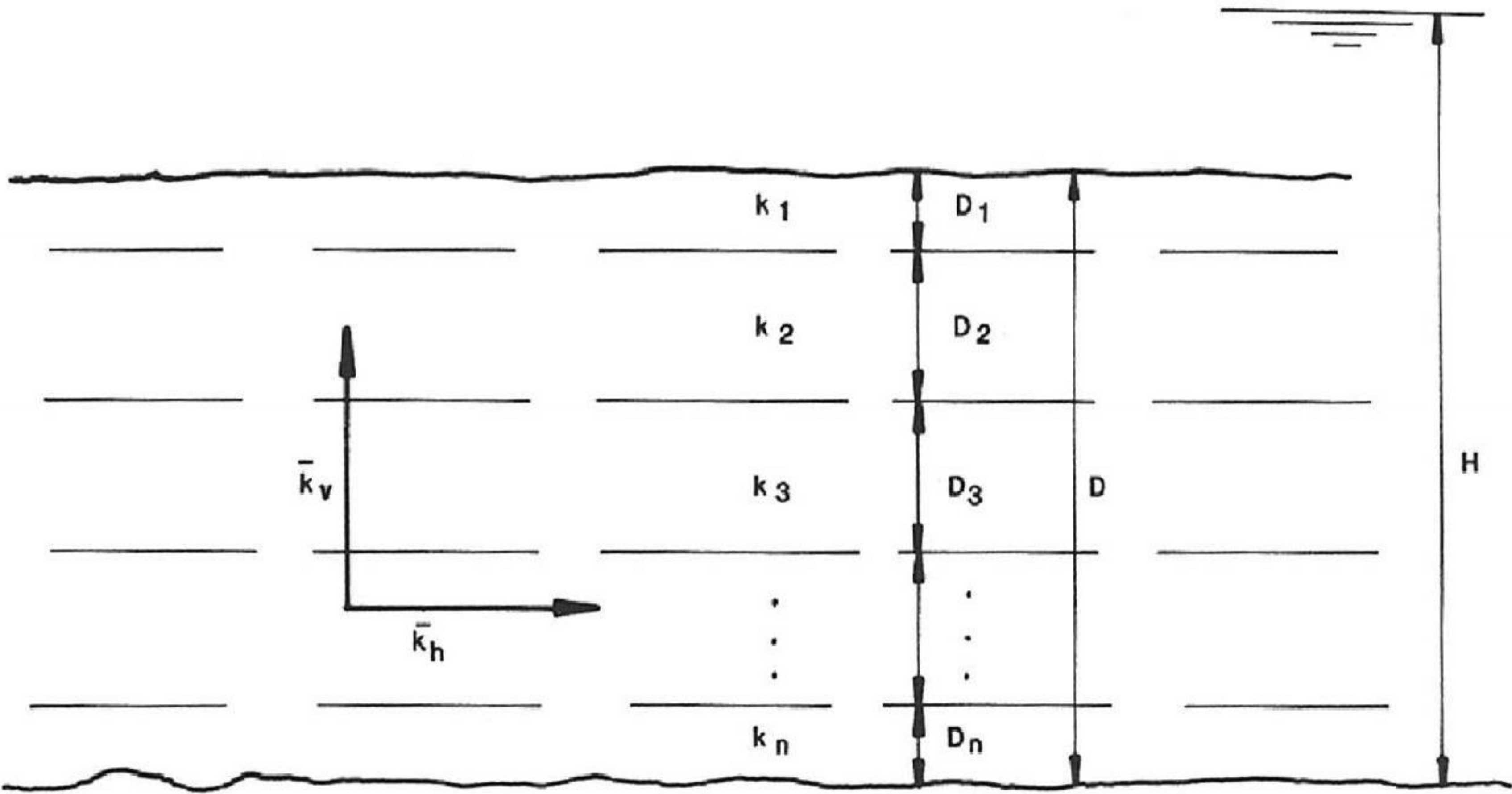
Persamaan dan grafik untuk analisis dan desain rembesan air

Catatan :

1. Metode yang digunakan dalam lampiran ini harus digunakan secara hati-hati, karena semuanya didasarkan atas perkiraan dengan asumsi fondasi yang sangat disederhanakan.
2. Beberapa metode yang diuraikan diperlukan penyederhanaan potongan dengan melakukan transformasi menjadi potongan isotropik ekuivalen seperti pada Gambar B.1 dan B.2.

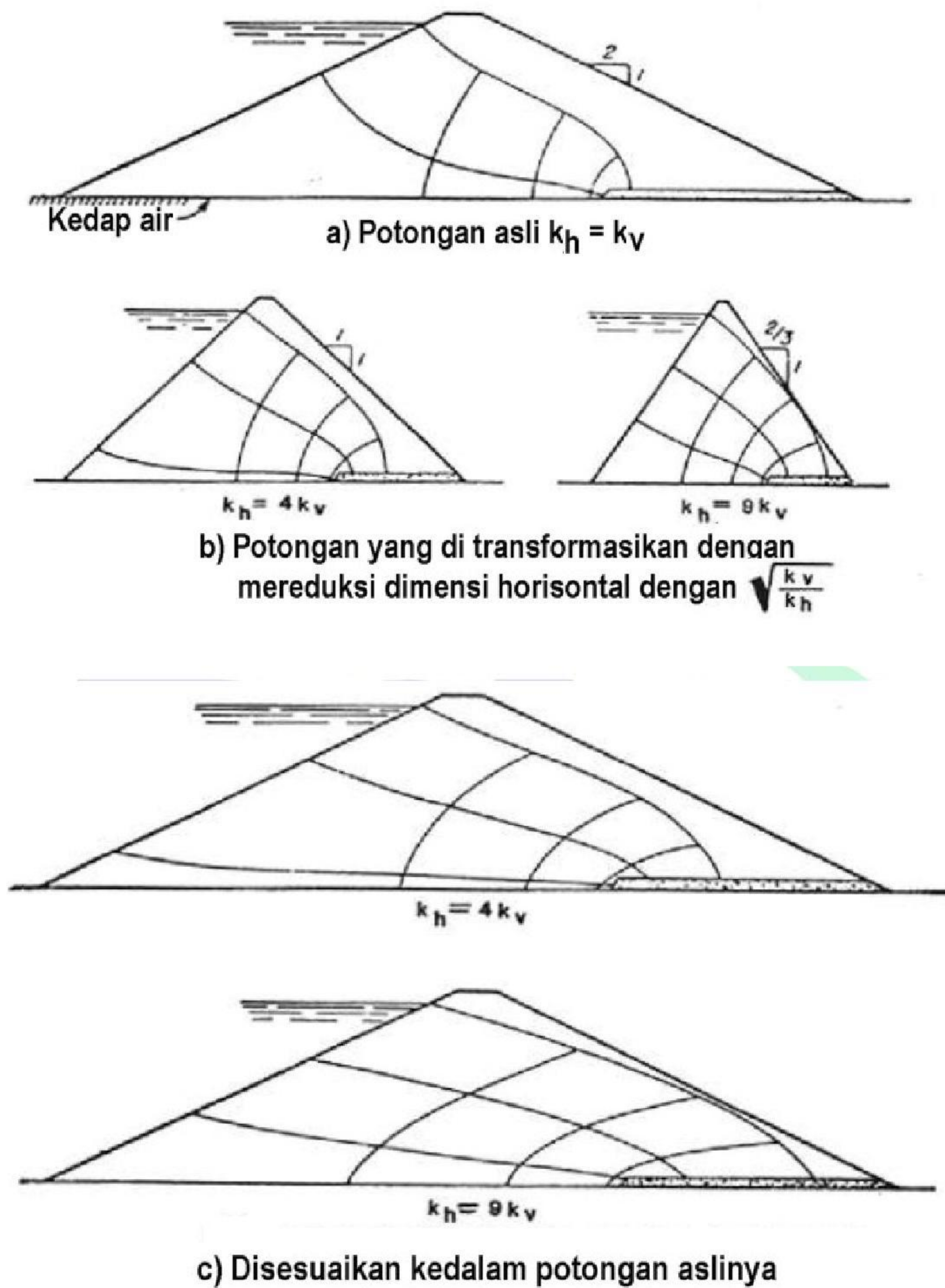
Gambar

- Gambar B.1 Persamaan permeabilitas untuk tanah berlapis
- Gambar B.2 Metode transformasi untuk analisis bendungan anisotropi ^[8.9]
- Gambar B.3 Pengaruh penetrasi sebagian dari parit halang ^[8.9]
- Gambar B.4 Pengaruh penetrasi sebagian dinding halang (*cut off wall*) ^[8.9]
- Gambar B.5 Efisiensi selimut kedap air dan dinding halang ^[8.9]
- Gambar B.6 Analisis sistem pelepas tekanan ^[8.9]
- Gambar B.7 Desain berm rembesan di hilir ^[8.9], $k_f > k_z$
- Gambar B.8 Persamaan untuk perhitungan selimut kedap air ^[8.9]
- Gambar B-9 Persamaan untuk perhitungan selimut semikedap air ^[8.9]

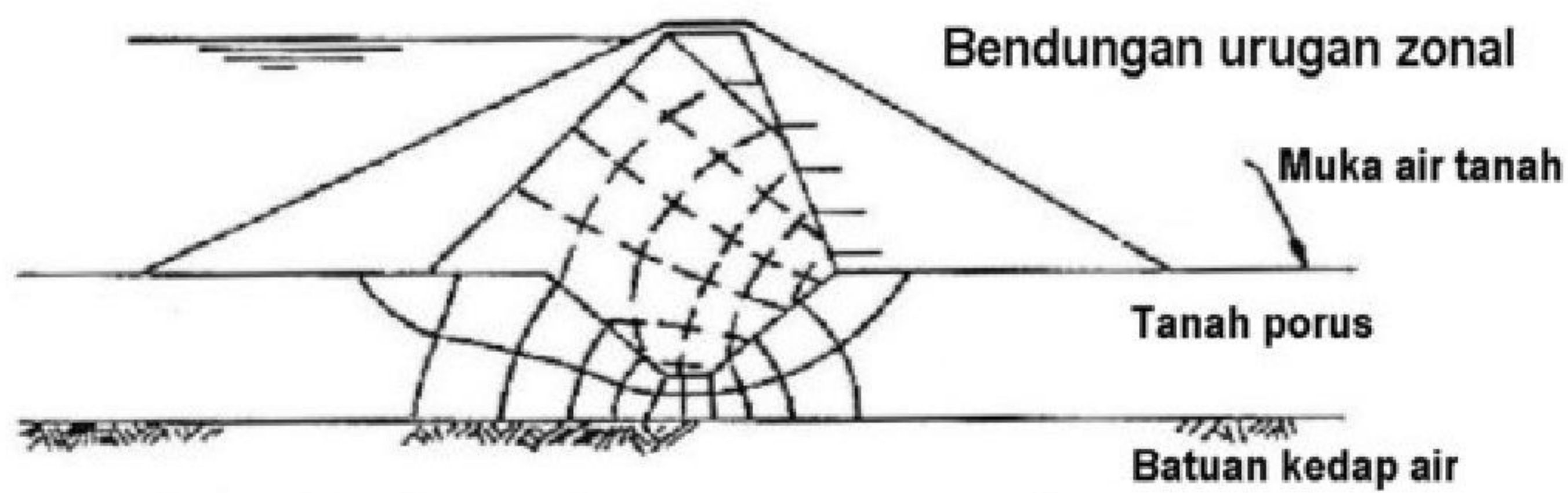


Vertikal	Horizontal
<p>Asumsi :</p> <p>1. Kecepatan Vertikal</p> $V = \bar{k}_v \frac{H}{D} = V_1 = V_2 = \dots V_n$ $k_1 i_1 = k_2 i_2 = \dots k_n i_n$ <p>2. Perbedaan head</p> $H = H_1 + H_2 + \dots H_n$ $= D_1 i_1 + D_2 i_2 + \dots D_n i_n$ $\therefore \bar{k}_v = \frac{D}{\sum_n \frac{D_n}{k_n}}$	<p>Asumsi :</p> <p>1. Aliran Horizontal</p> $Q_h = \bar{k}_h i_h D = k_1 i_h D_1 + k_2 i_h D_2 + \dots k_n i_h D_n$ $\therefore \bar{k}_h = \frac{1}{D} \sum_n k_n D_n$

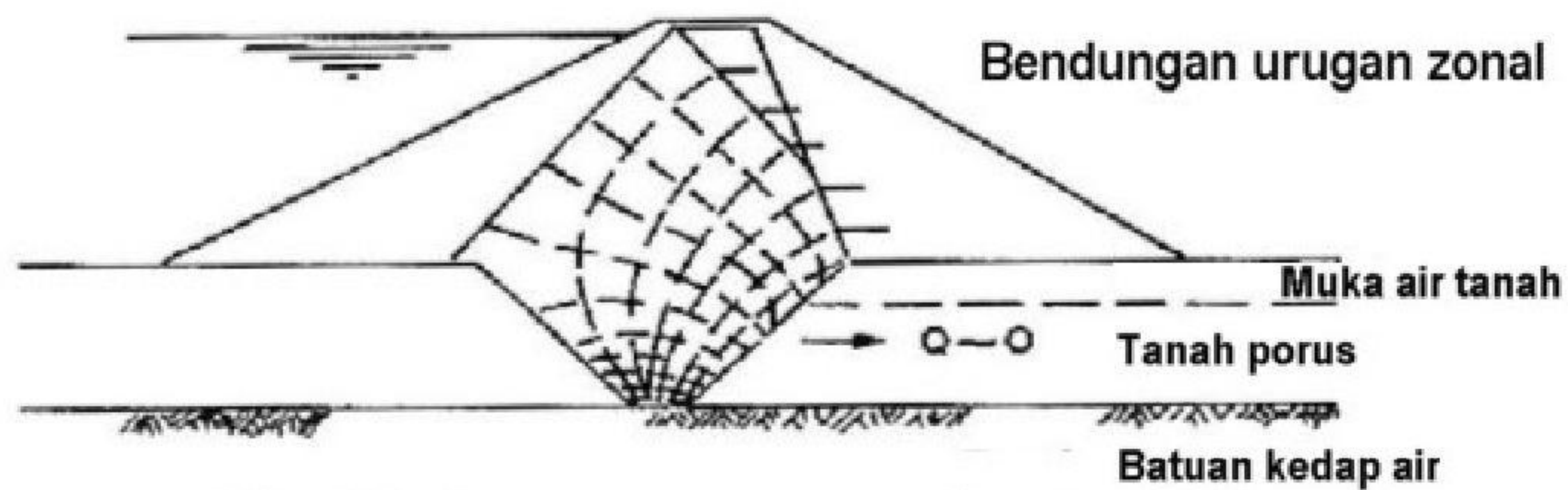
Gambar B.1 - Persamaan permeabilitas untuk tanah berlapis



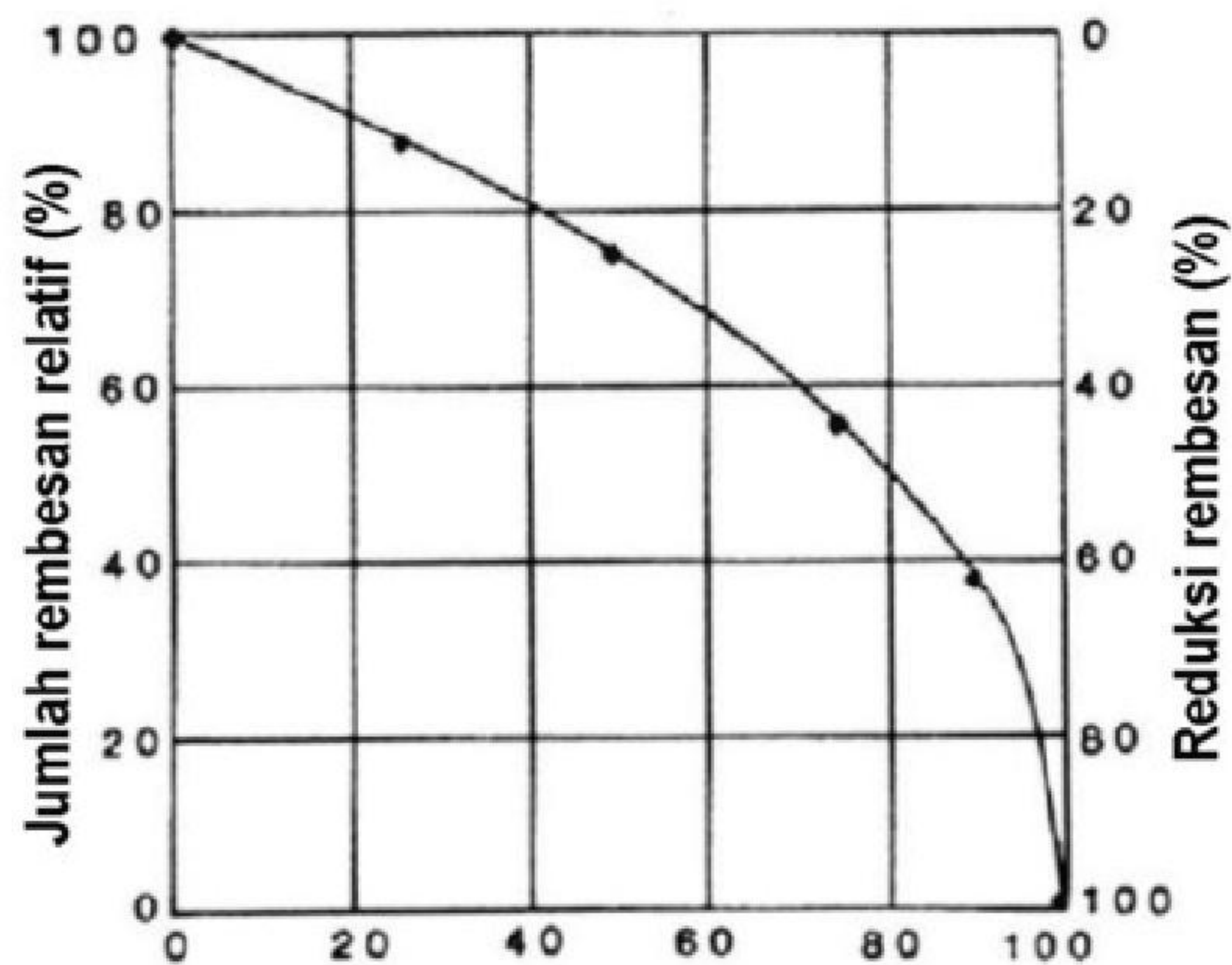
Gambar B.2 - Metode transformasi untuk analisis bendungan anisotropi [8.9]



a) Parithalang dengan penetrasi sebagian

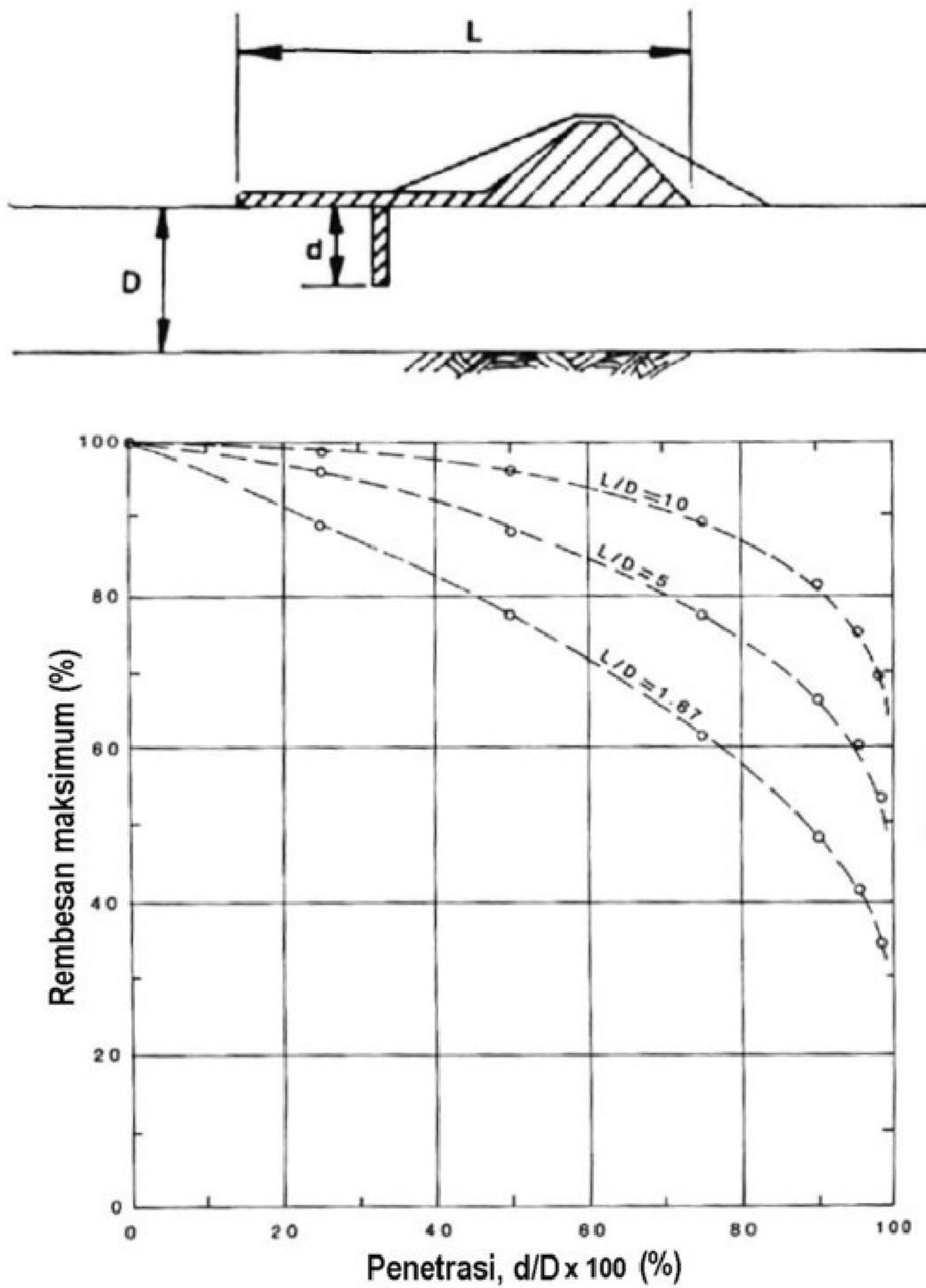


b) Parithalang dengan penetrasi penuh

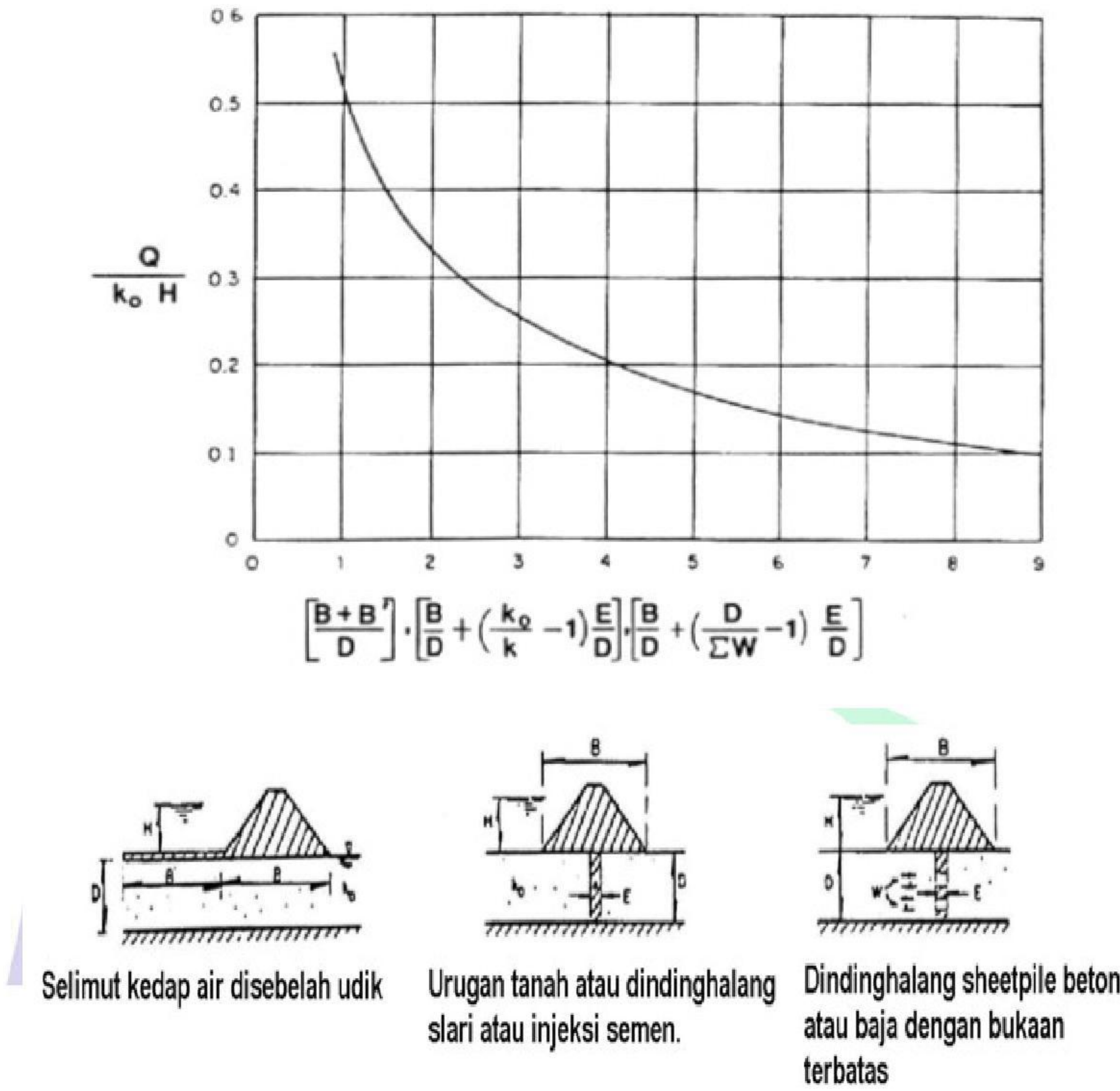


c) Hubungan antara jumlah rembesan dengan kedalaman penetrasi parithalang (menurut Cedergren)

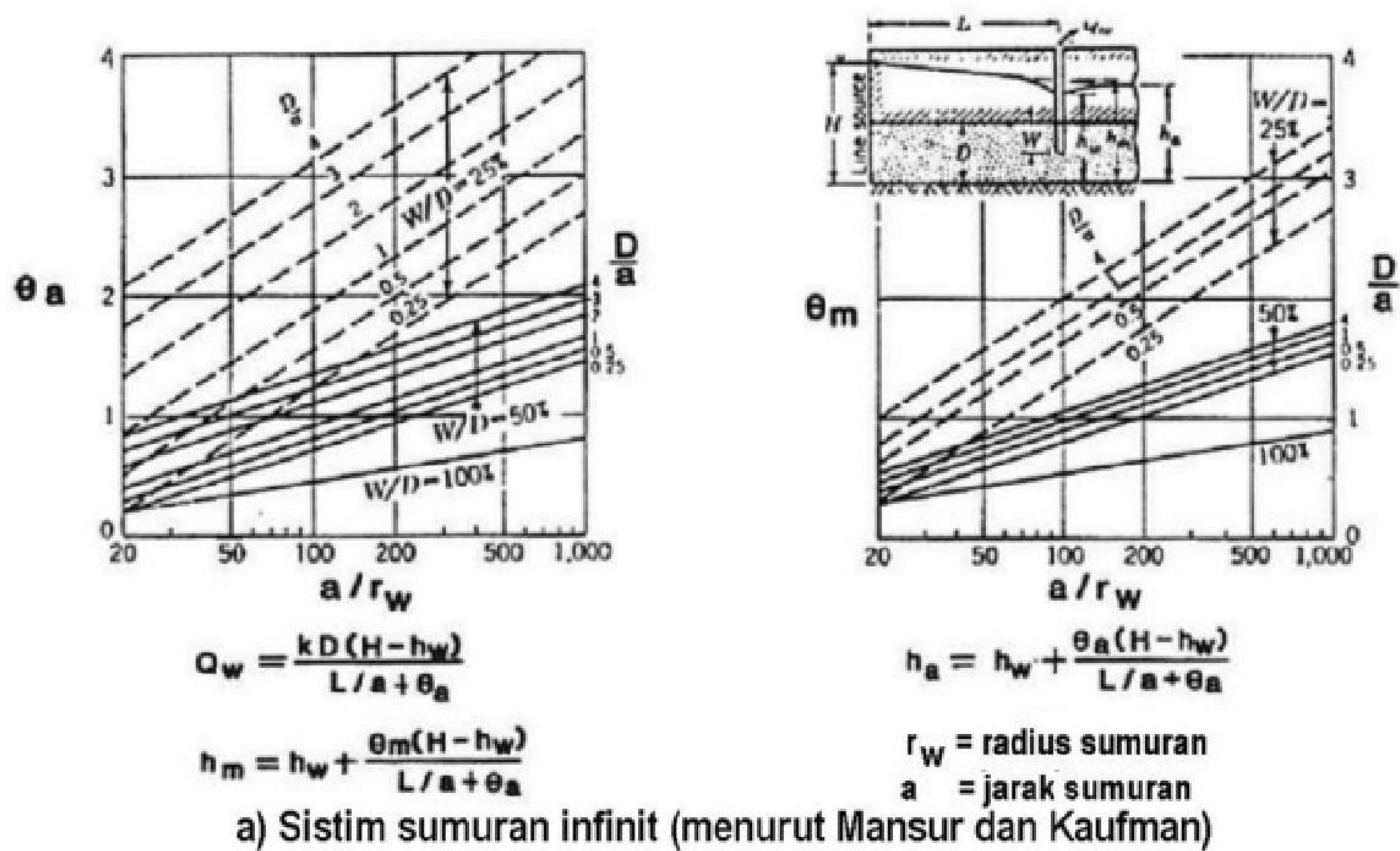
Gambar B.3 - Pengaruh penetrasi sebagian dari parithalang ^[8.9]



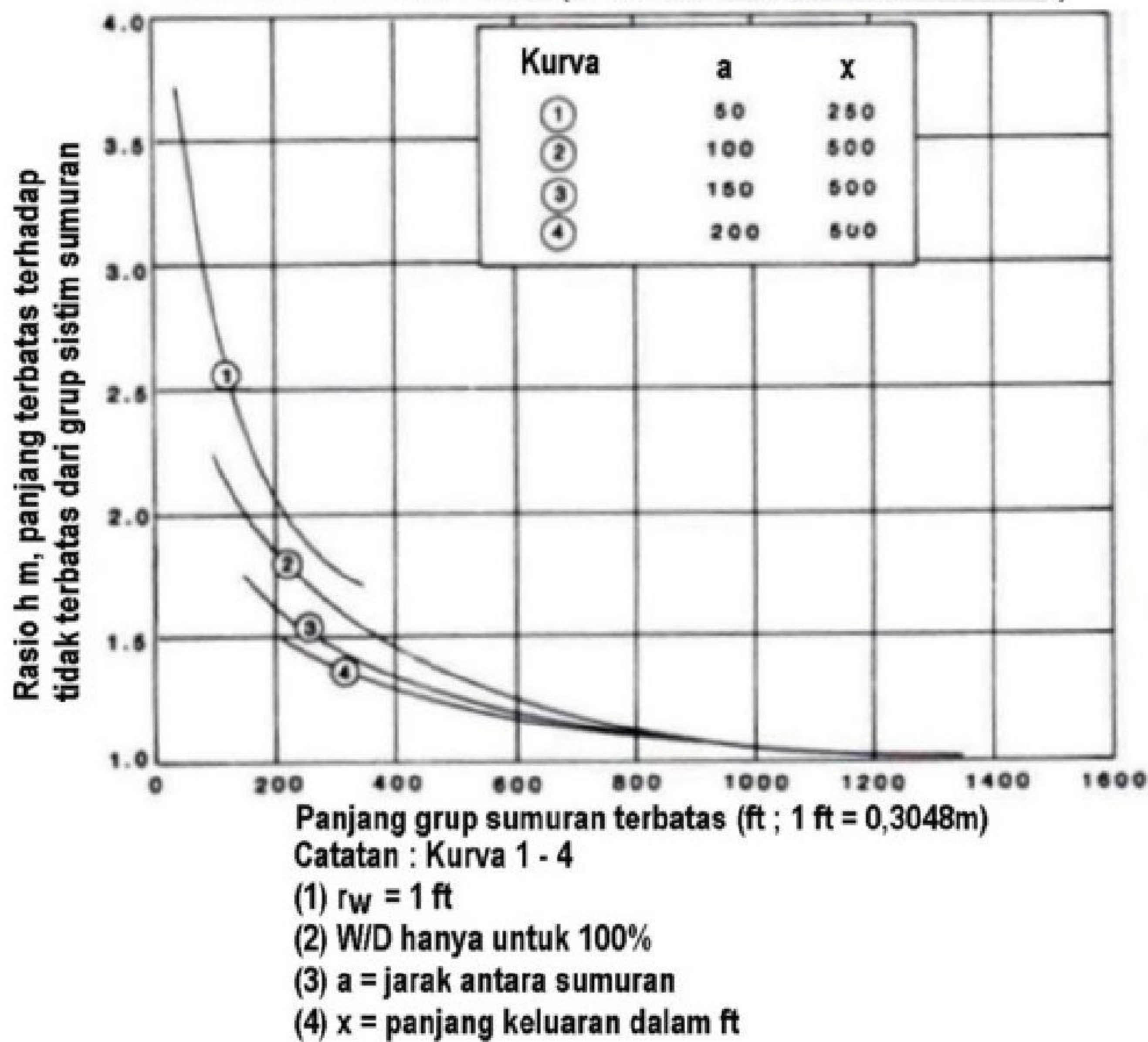
Gambar B.4 - Pengaruh penetrasi sebagian dinding halang (*Cutoff Wall*) ^[8.9]



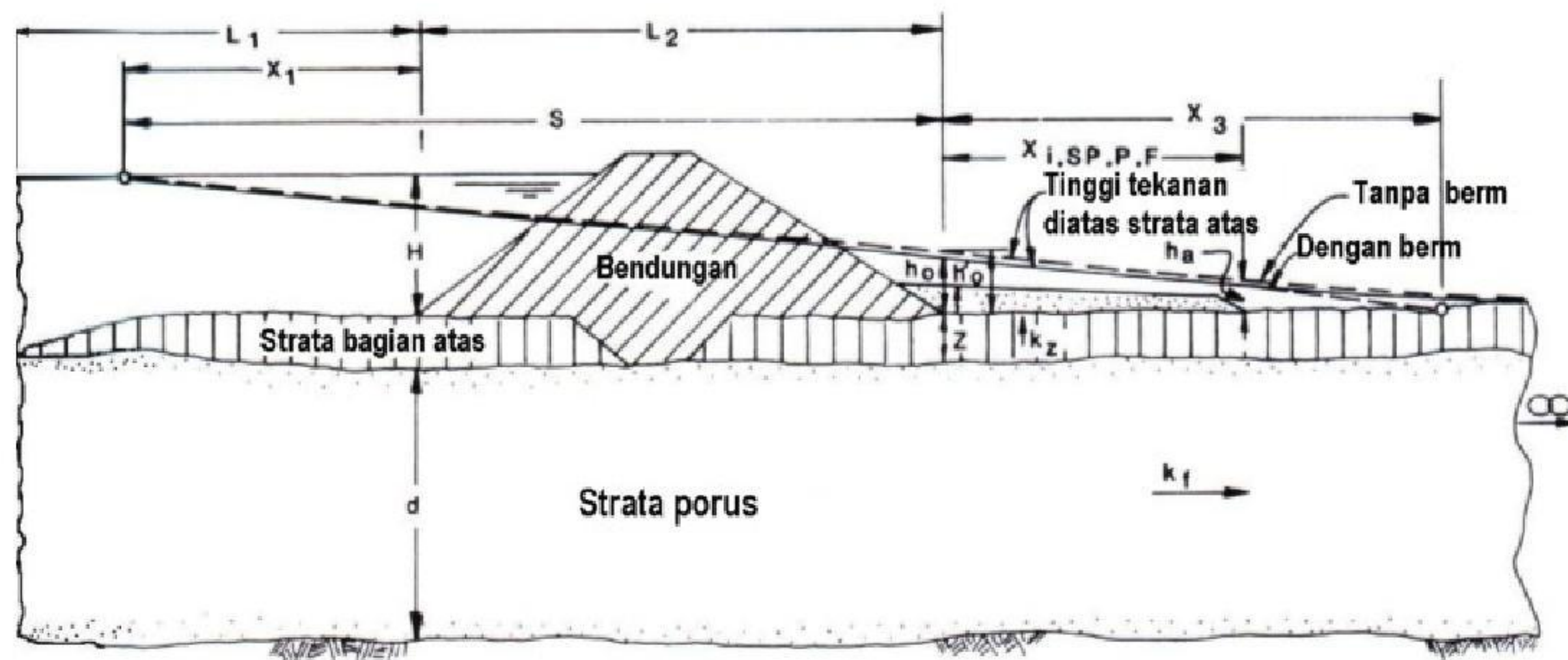
Gambar B.5 - Efisiensi selimut kedap air dan dinding halang ^[8.9]



Sistim sumuran infinit (menurut Mansur dan Kaufman)



Gambar B.6 - Analisis sistem sumur pelepas tekanan [8.9]



$$c = \sqrt{\frac{k_z}{k_f Z d}}$$

γ'_z = berat volume efektif pada strata (t/m^3)

γ'_t = berat volume efektif pada berm (t/m^3)

γ_w = berat volume air (t/m^3)

X_3 = panjang efektif lapisan di bagian hilir (m)

$$= \frac{1}{c}$$

X_1 = panjang efektif lapisan di bagian hulu (m)

$$= \frac{\tanh cL_1}{c}$$

h_0 = tinggi air pada kaki bendungan di bagian hilir tanpa berm (m)

$$\frac{HX_3}{S + X_3}$$

h_1 = tinggi air pada kaki bendungan dengan berm (m)

i_0 = gradien ke atas pada kaki bendungan di bagian hilir (gunakan $i_0 = 0.2$)

i_a = gradien yang diijinkan pada kaki berm (gunakan $i_a = 0.3$)

h_a = tinggi air yang diijinkan pada kaki berm (m)

$$= i_a Z$$

$X_{1,SP,P,F}$ = lebar berm yang diperlukan (m)

t = ketebalan berm yang diperlukan pada kaki bendungan (m)

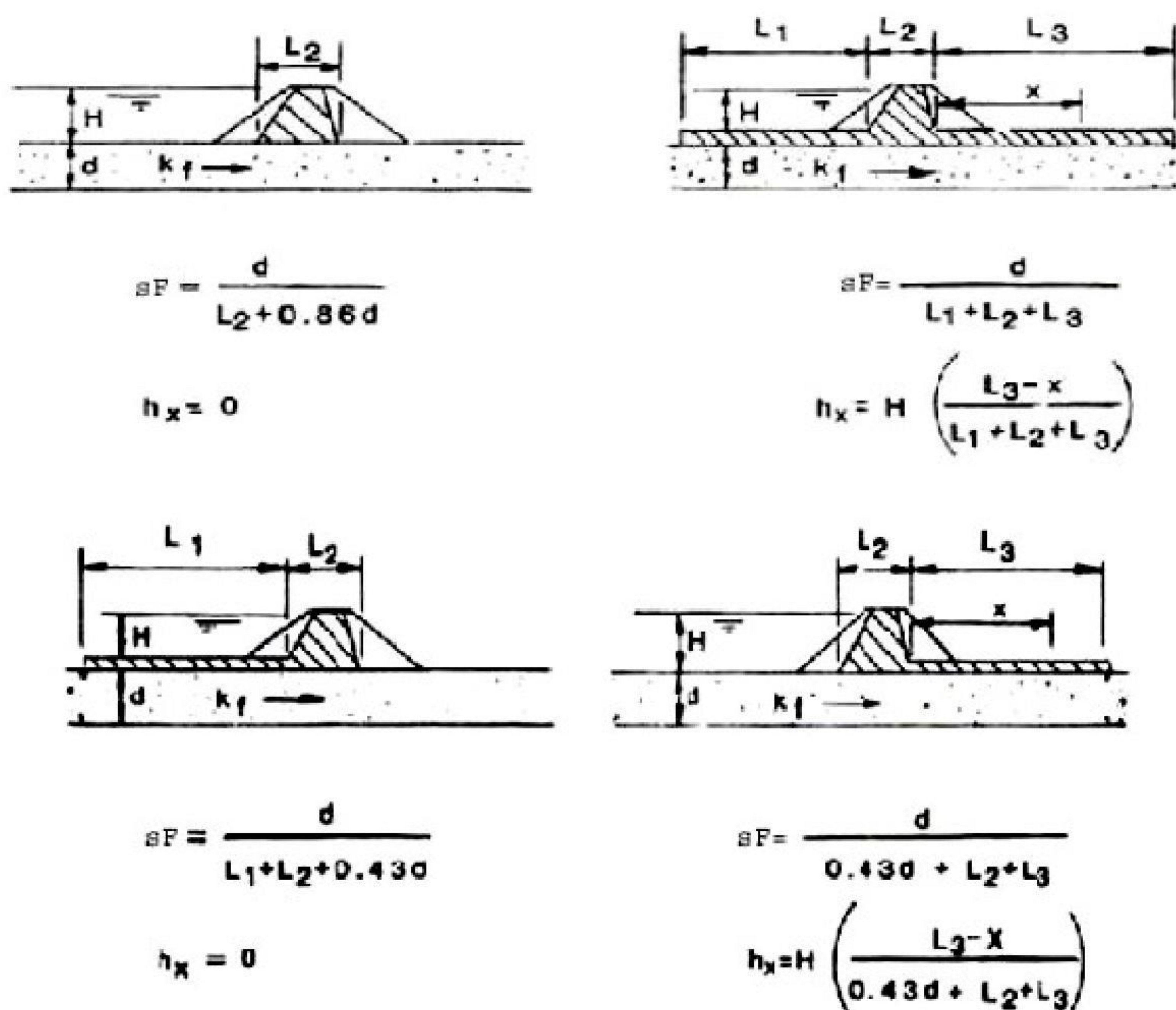
k_t = koefisien permeabilitas pada berm (m/det)

F = faktor keamanan untuk gaya ke atas pada kaki bendungan (gunakan $F = 2.0$)

Q_B = debit bocoran pada berm per satuan panjang bendungan (m^3/det)

Berm kedap air ($k_1 = 0$)	Berm semi kedap air ($k_1 = k_2$)	Berm porus ($k_1 > k_2$)	Berm drainase bebas
$X_1 = X_3 \left(\frac{H}{h_a} - 1 \right) - S$ $h'_0 = H \left(\frac{X_3 + X_1}{S + X_3 + X_1} \right)$ $t = \frac{h'_0 - Z \left(\frac{\gamma'_z}{F\gamma_w} \right)}{1 + \frac{\gamma_t}{F\gamma_w}}$	$X_{SP} = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 24(2+r)(1-SC) - \frac{H}{h_a}}}{2c(2+r)}$ Dimana : $A = 6 + 3 SC (r + 1)$ $r = \frac{i_0}{i_a}$ $h'_0 = h_a \left[1 + CX_{SP} + \left(\frac{2+r}{6} \right) (CX_{SP})^2 \right]$ $t = \frac{h'_0 - i_0 Z}{1 + i_0}$	$X_p = \frac{1}{3} (X_p + 2X_{SP})$ $h'_0 = h_a \left[1 + CX_p + \left(\frac{2+r}{6} \right) (CX_p)^2 \right]$ $t = \frac{h'_0 - Z \left(\frac{\gamma'_z}{F\gamma_w} \right)}{1 + \frac{\gamma_t}{F\gamma_w}}$	$X_F = X_3 \log_e \left(\frac{h'_0}{h_a} \right)$ $h'_0 = h_0 = \frac{HX_3}{S + X_3}$ $t = \frac{h'_0 - Z \left(\frac{\gamma'_z}{F\gamma_w} \right)}{1 + \frac{\gamma_t}{F\gamma_w}}$ $Q_B = \frac{k_f dH}{S + X_3} \left(1 - e^{-\frac{X_F}{X_3}} \right)$

Gambar B.7 - Desain berm rembesan di hilir ^[8.9], $k_f > k_z$

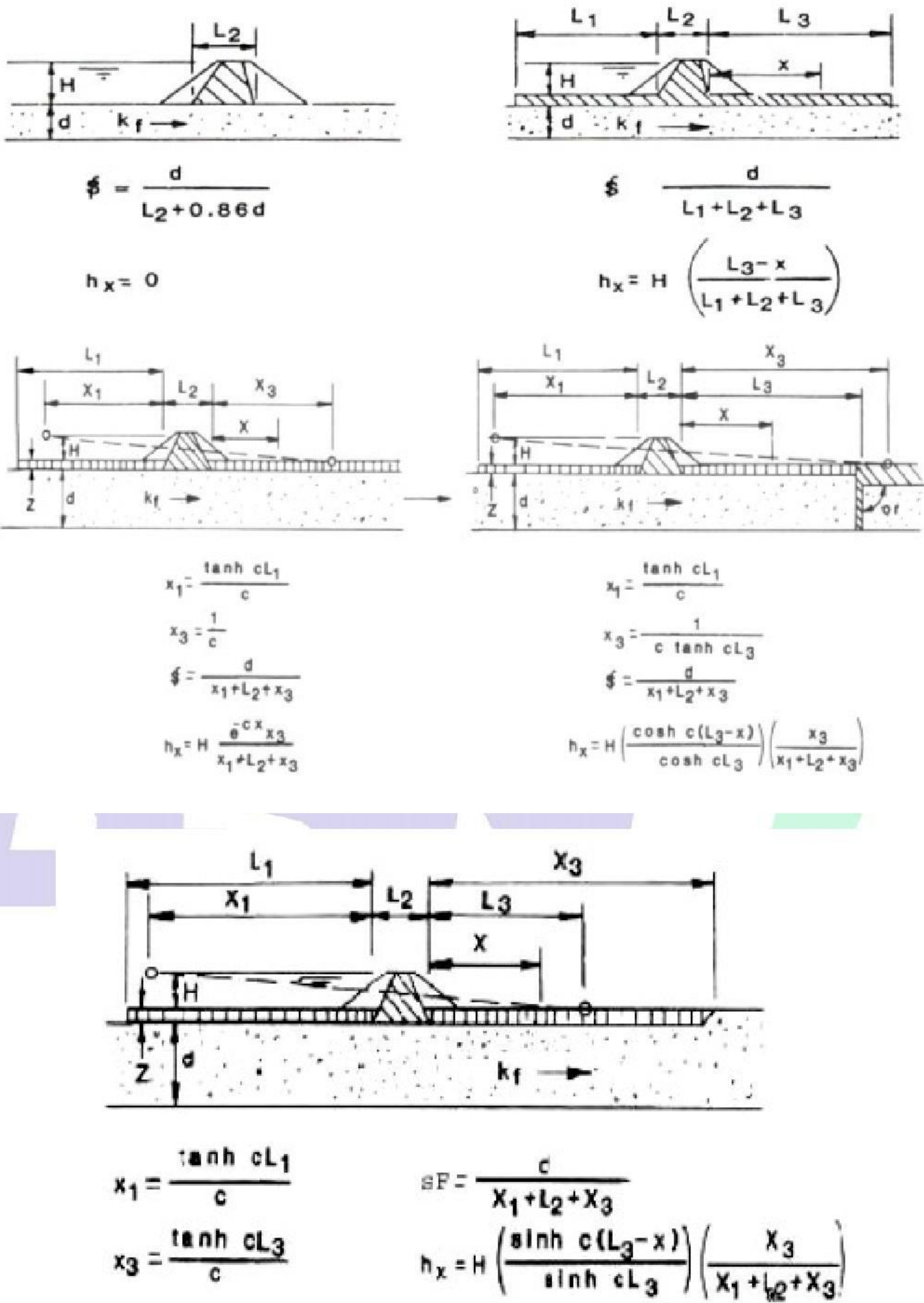


Head di bawah selimut kedap air pada jarak x dari kaki bagian hilir h_x

Faktor bentuk yang digunakan dalam persamaan rembesan..... sF

Rembesan pada bendungan per satuan panjang..... $Q = sF k_f H$

Gambar B.8 - Persamaan untuk perhitungan selimut kedap air ^[8.9]



Head di bawah selimut kedap air sejauh x dari kaki bendungan hilir..... h_x
Koefisien permeabilitas pada lapisan fondasi..... k_f
Faktor..... $c = \sqrt{\frac{k_b}{k_f Z d}}$
Faktor bentuk yang digunakan dalam persamaan rembesan..... sF
Rembesan pada bendungan per satuan panjang..... $Q = sF k_f H$

Gambar B.9 - Persamaan untuk perhitungan selimut semikedap air [8.9]

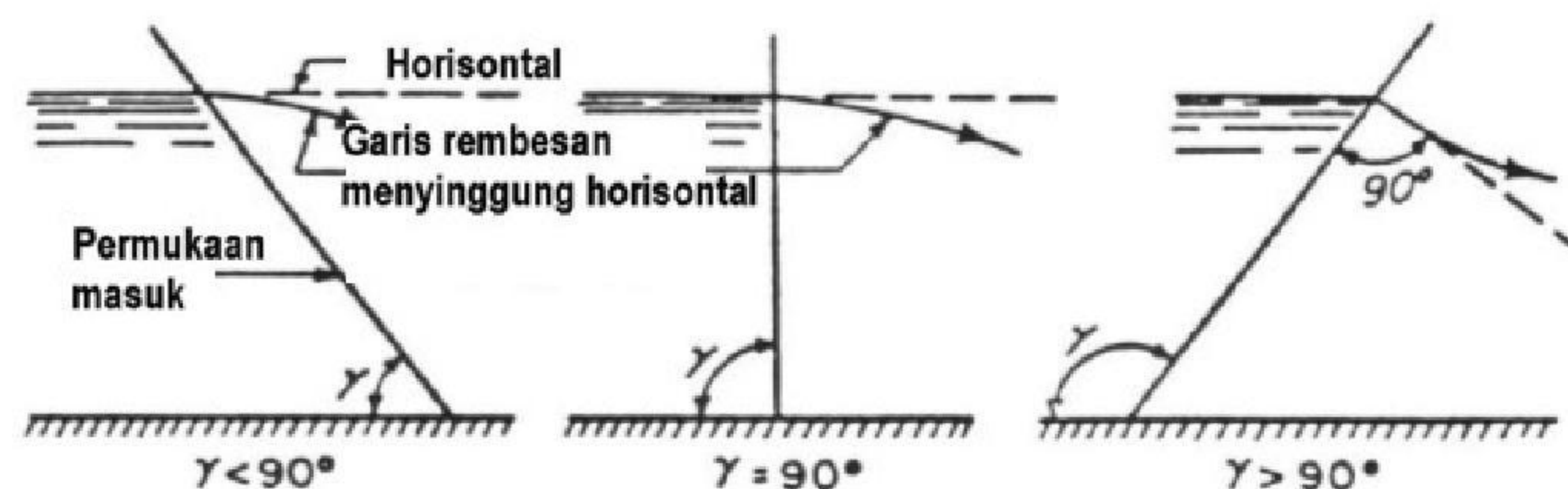
Lampiran C
(informatif)
Metode grafis rembesan air

(Bahan diambil dari *United States Bureau of Reclamation , Design Standards Embankment Dams No. 13, Chapter 8, Seepage Analysis and Control*)

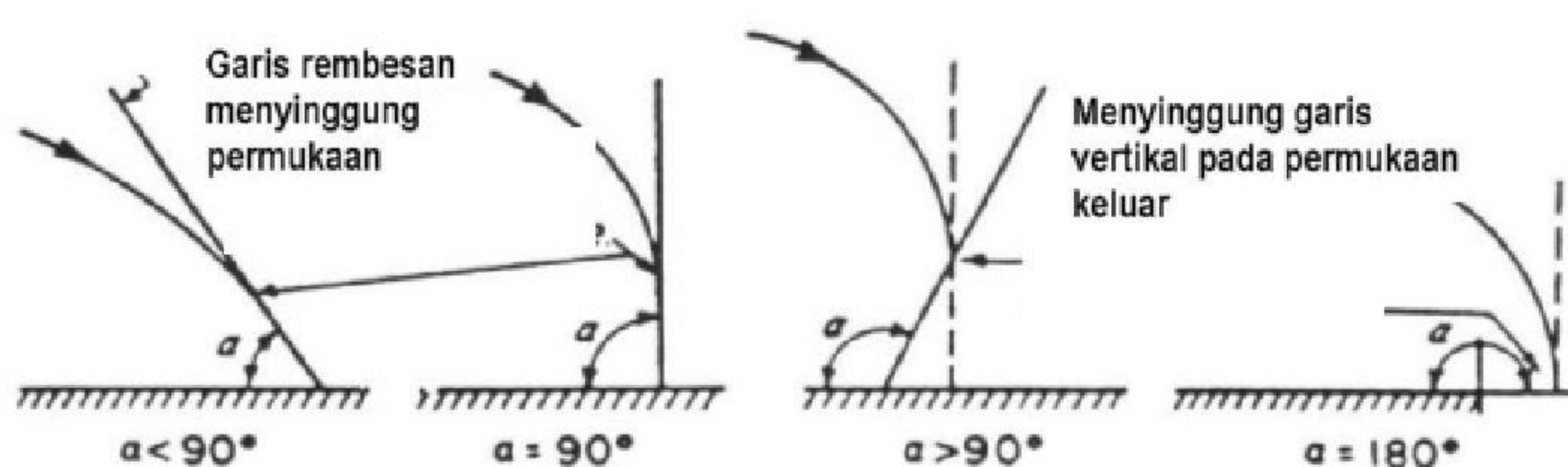
Catatan :

- 1) Potongan yang akan dianalisis harus ditransformasikan ke dalam potongan isotropik ekuivalen seperti diuraikan dalam Gambar B.1 dan B.2 pada Lampiran B, sebelum menggunakan metode pada Lampiran C.
- 2) Setelah menggunakan metode ini, semua dimensi, termasuk garis freatik dan/atau jaring alir, harus ditransformasikan ke potongan aslinya sebelum melakukan perhitungan gradien hidraulik dan gaya rembesan air
- 3) Perhitungan debit aliran dapat dilakukan dengan mentransformasikan potongan menggunakan koefisien permeabilitas transformasi $k = k_h \times k_v$

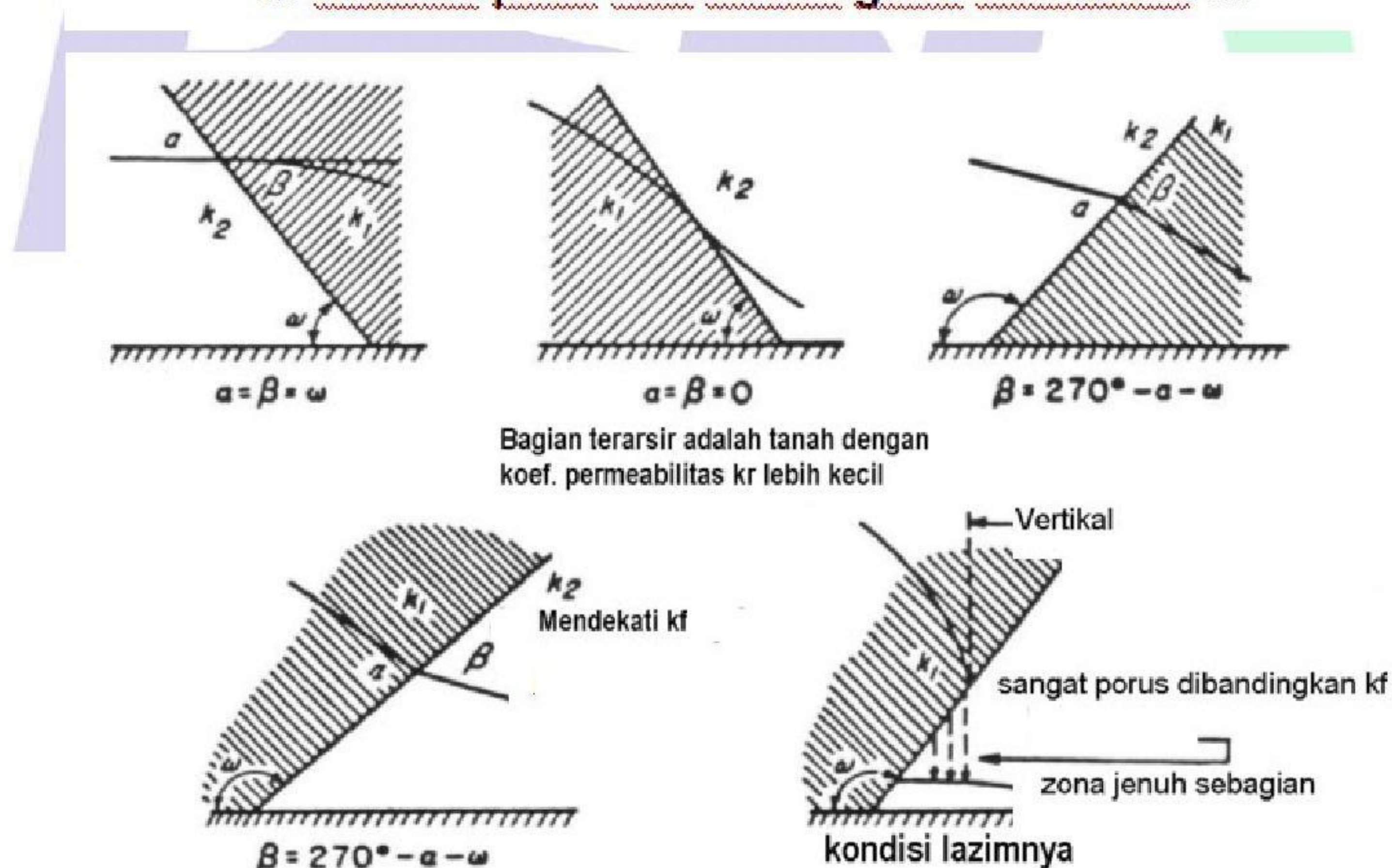




a. Kondisi pada titik masuk garis rembesan

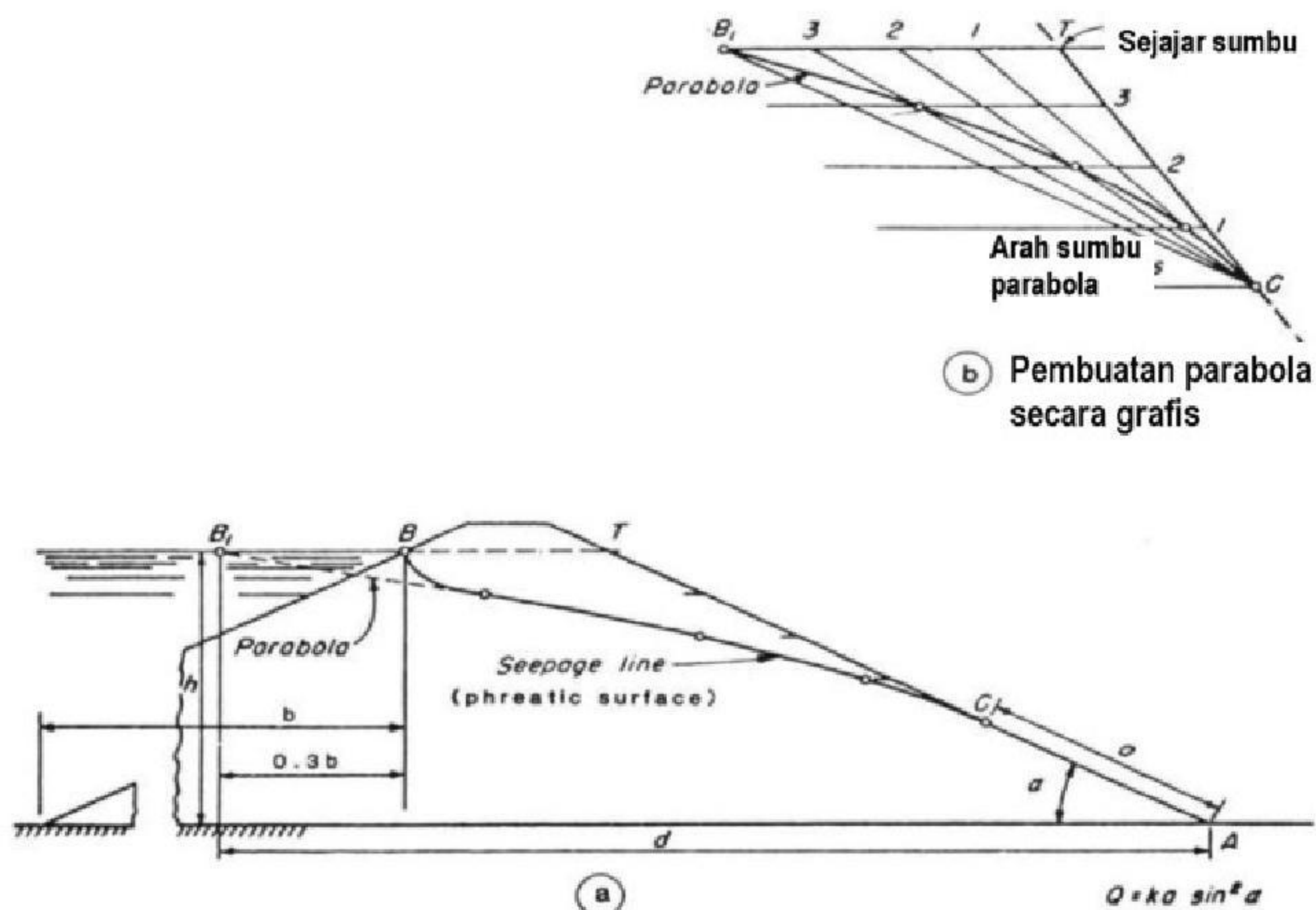


b. Kondisi pada titik keluar garis rembesan air



c. Pembelokan garis rembesan antara dua batas tanah dengan permeabilitas berlainan

Gambar C.1 - Garis aliran pada kondisi masuk (*entrance*), keluar (*discharge*), dan pembelokan (*deflection*)



Prosedur penggambaran garis freatik :

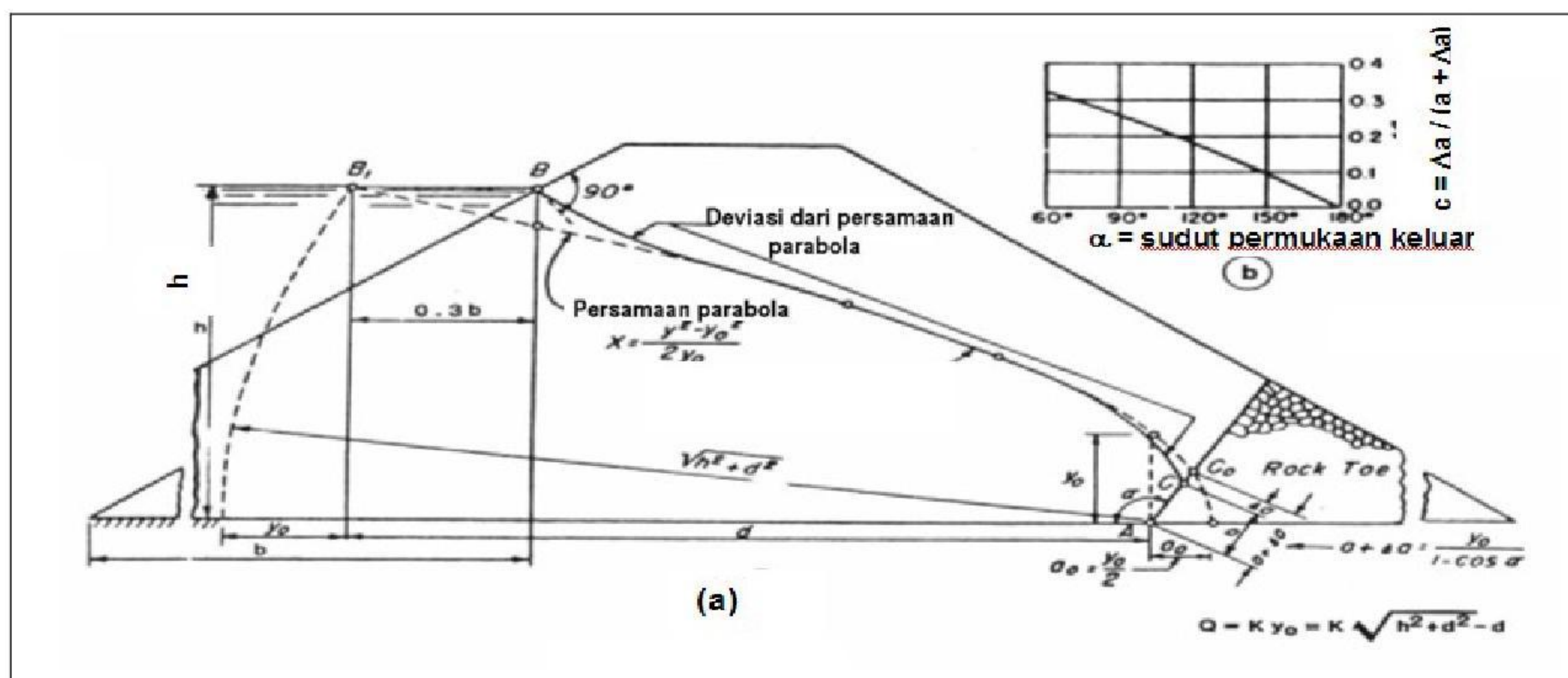
1. Gambar potongan ini seperti pada gambar (a), jika diperlukan
2. Tentukan titik B₁, BB₁ = 0.3 b
3. Tentukan titik r C dari persamaan

$$a = S_0 - \sqrt{S_0^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}, \text{ dengan } S_0 \text{ adalah panjang garis rembesan } B_1CA$$

$$S_0 = \sqrt{h^2 + d^2}$$

4. Plot parabola dengan metode grafik yang ditunjukkan pada gambar (b)
5. Lengkapi garis rembesan sketsa kurva dengan menghubungkan titik "B" dengan parabola- parabola
6. Buatlah sesuai dengan gambar (a).

Gambar C.2 - Penentuan garis freatik untuk potongan yang homogen pada fondasi kedap air (untuk $\alpha < 60^\circ$)



Prosedur penggambaran garis freatik :

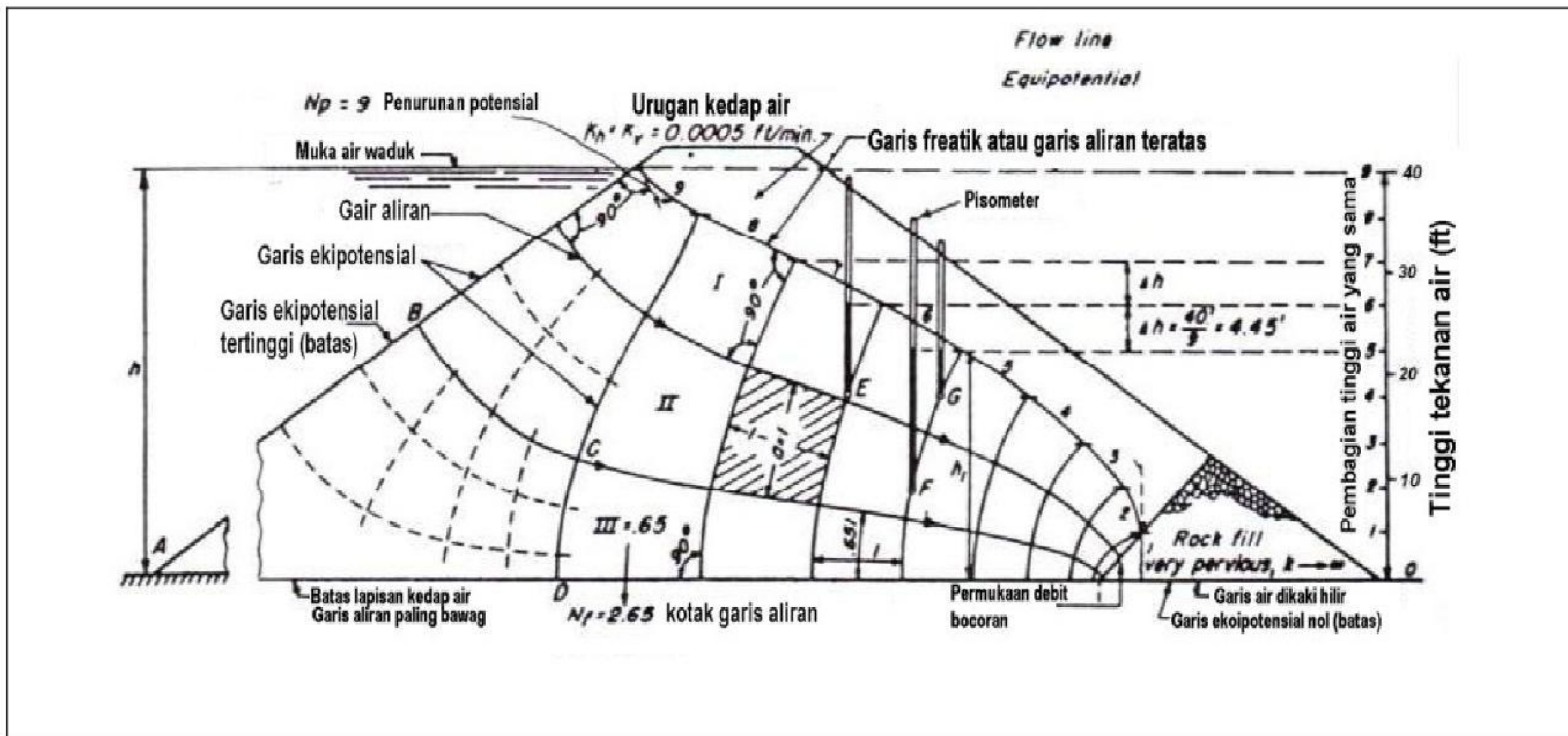
1. Gambar potongan seperti gambar (b) , jika diperlukan
2. Tentukan titik B₁, $BB_1 = 0.3 b$
3. Tentukan y_0 secara grafis ditunjukkan atau dengan persamaan

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

Plot parabola awal dari persamaan $X = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$ atau tentukan secara grafis seperti gambar a

4. Tentukan panjang $a + \Delta a$ dan hitung Δa dari grafik b
5. Tentukan titik C dan sketsa kurva dari titik C sampai parabola awal
6. Lengkapi garis rembesan sketsa perpindahan kurva dengan menghubungkan titik "B" berbentuk parabola

Gambar C.3 - Penggambaran garis freatik untuk potongan homogen dengan fondasi kedap air ($\alpha < 60^\circ$)



Perhitungan :

1. Hitung per unit lebar potongan :

$$Q = kh \frac{N_f}{N_p} = 0,005 \times 40 \times \frac{2,65}{9} = 0,059 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

per ft dari bendungan

2. Tekanan hidrostatik pada beberapa titik :

$$h_1 = \frac{n_p}{N_p} h, \text{ dengan } n_p = \text{angka potensial}$$

terletak antara titik dan tekanan nol

$$\text{Pada titik E, } h_1 = \frac{6}{9} \times 40' = 26.7 \text{ ft.}$$

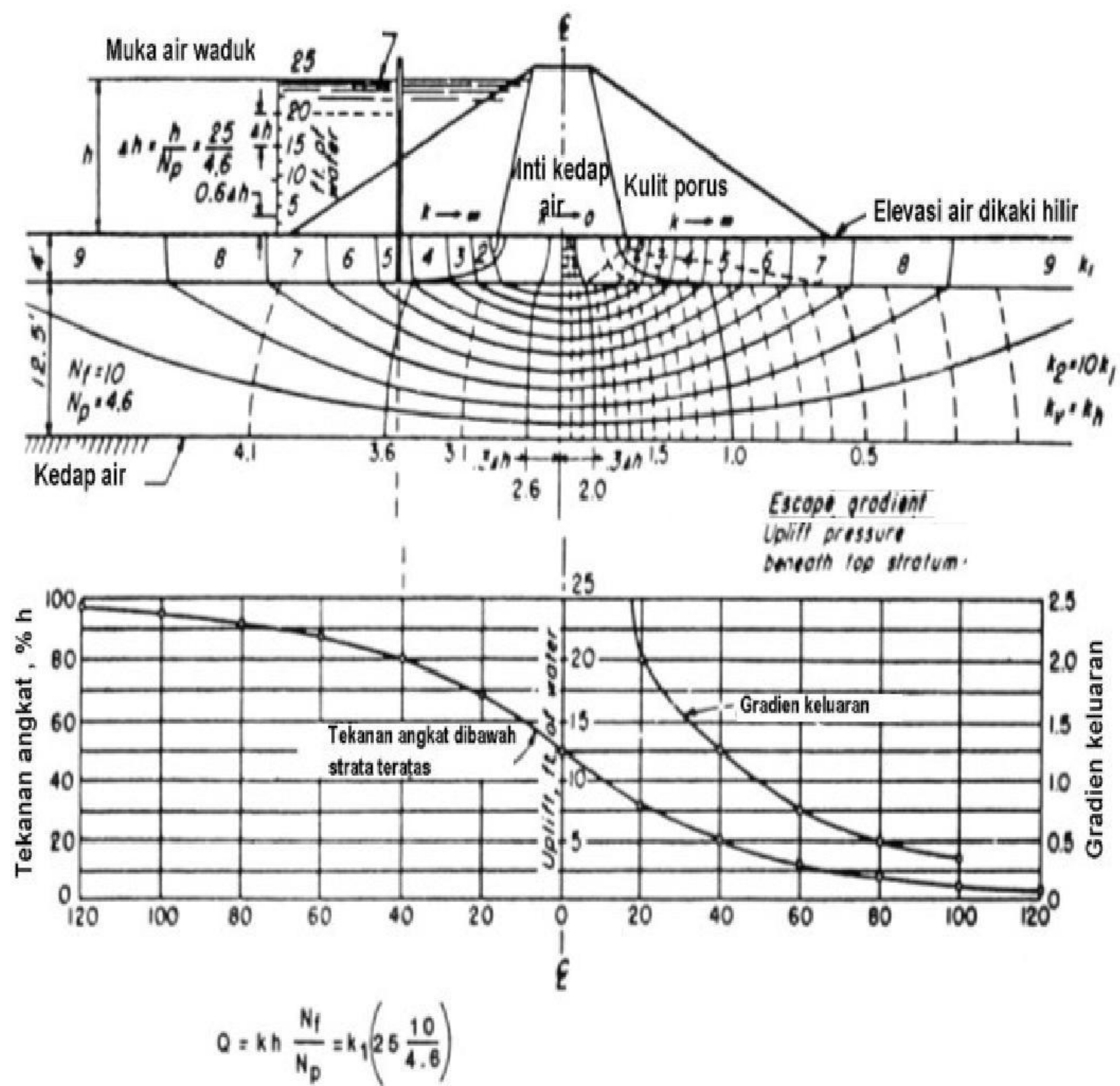
$$\text{Pada titik F dan G, } h_1 = \frac{5}{9} \times 40' = 22.2 \text{ ft.}$$

h_1 juga dapat ditentukan secara grafis

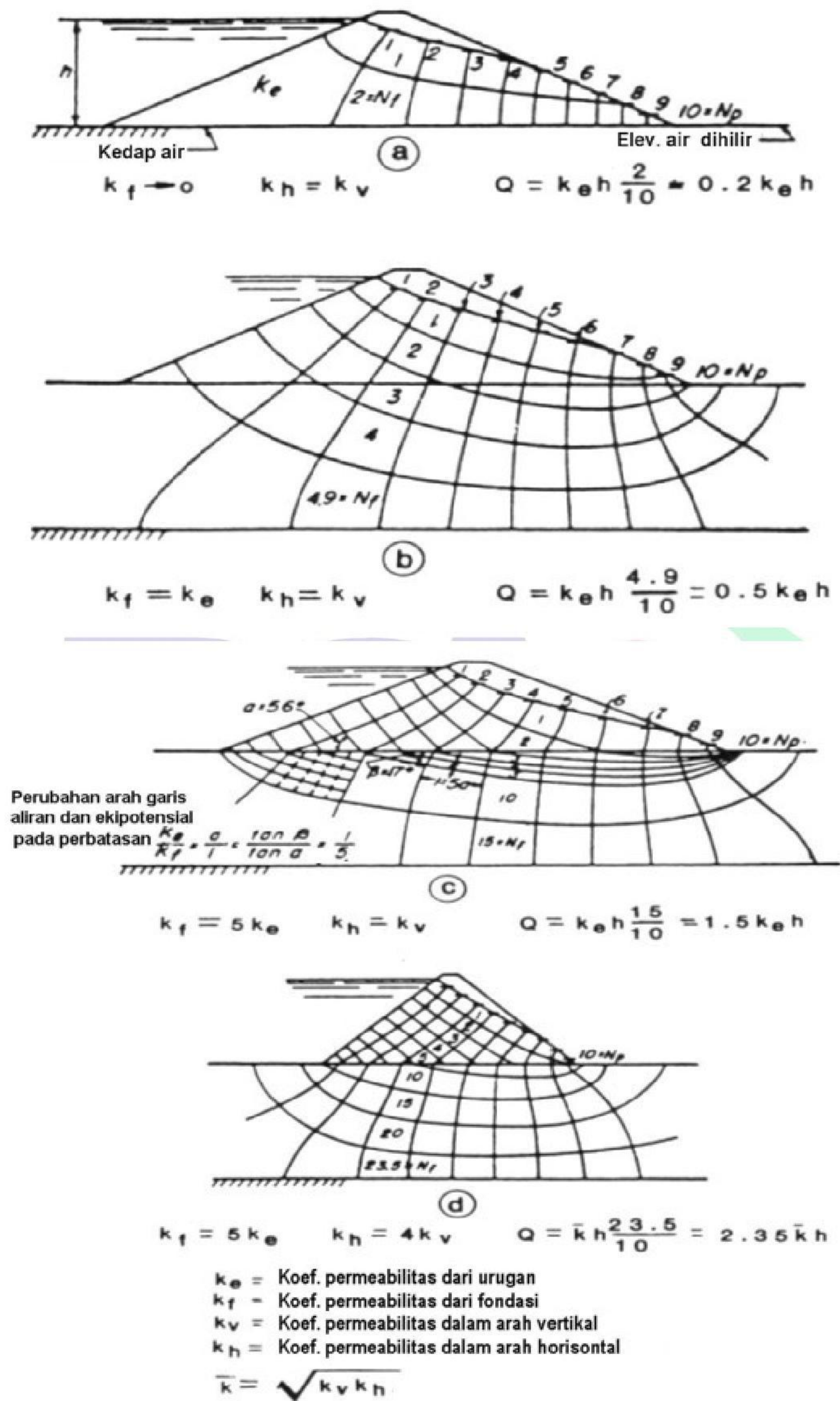
3. Gradien hidraulik rata – rata berbentuk elemen “bujur sangkar” :

$$i = \frac{\Delta h}{l}, \text{ untuk luas terarsir, } i = \frac{4.45'}{11.2'} = 0.40$$

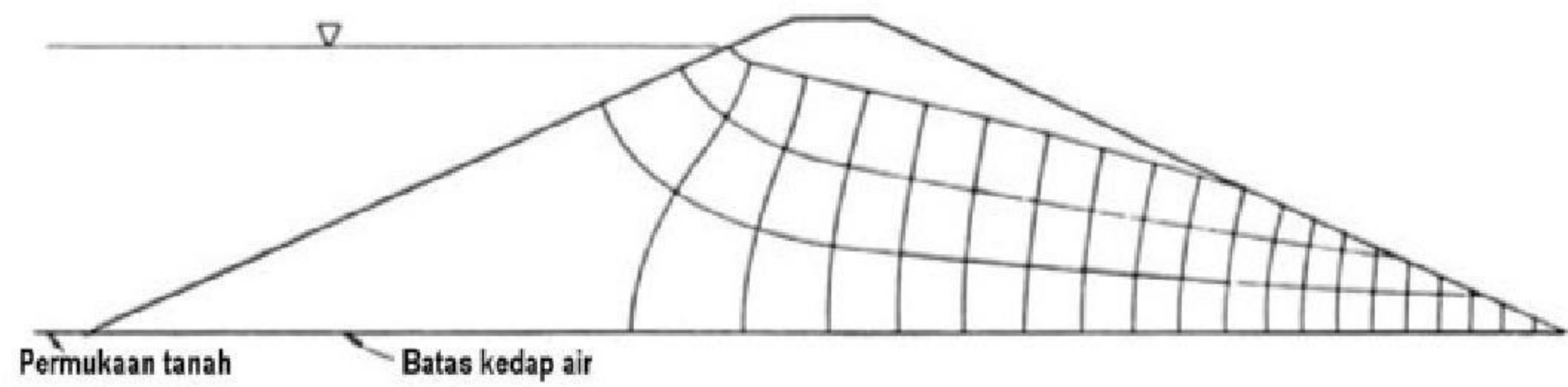
Gambar C.4 - Perhitungan dan kebutuhan dasar untuk menentukan jaring-jaring aliran rembesan



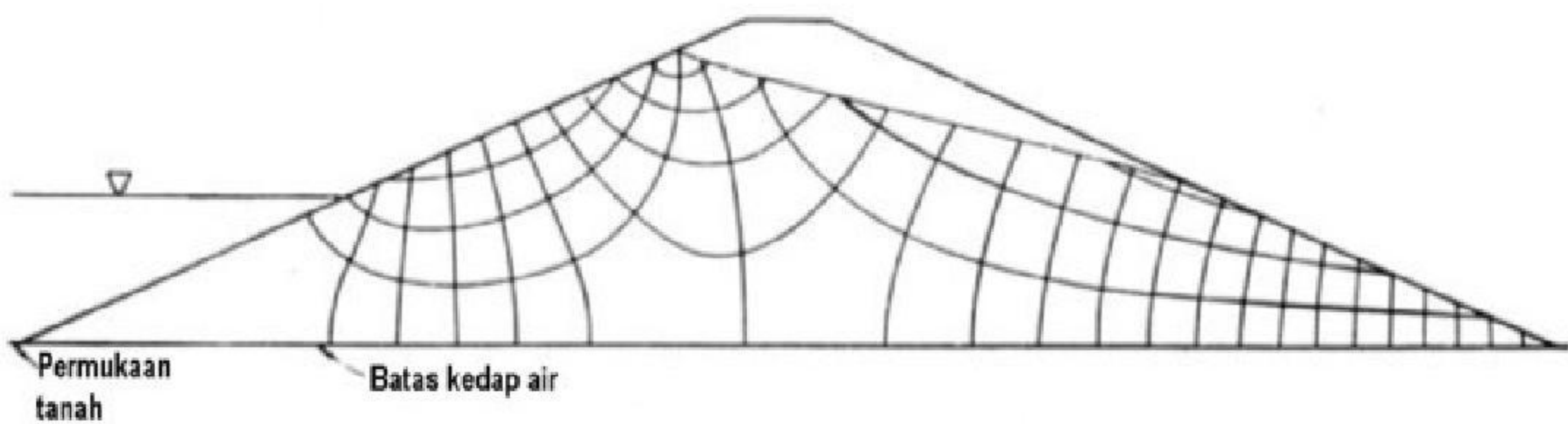
Gambar C.5 - Perhitungan rembesan melalui fondasi



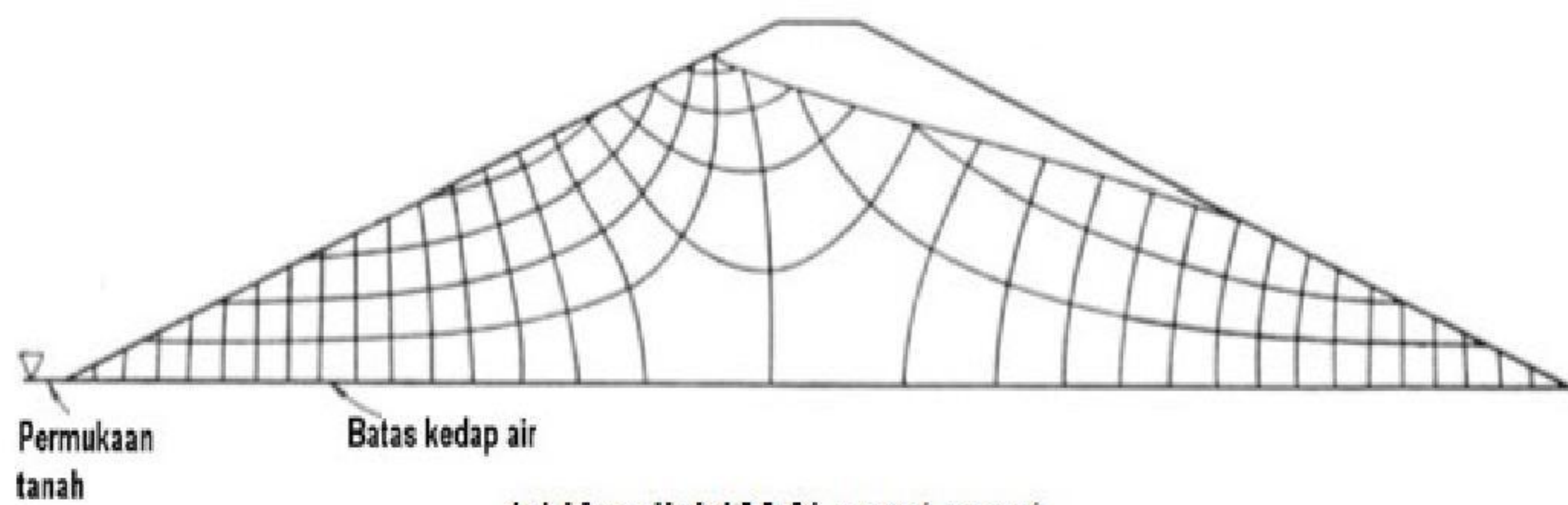
Gambar C.6 - Rembesan melalui tubuh bendungan dan fondasi



(a) Kondisi rembesan langgeng

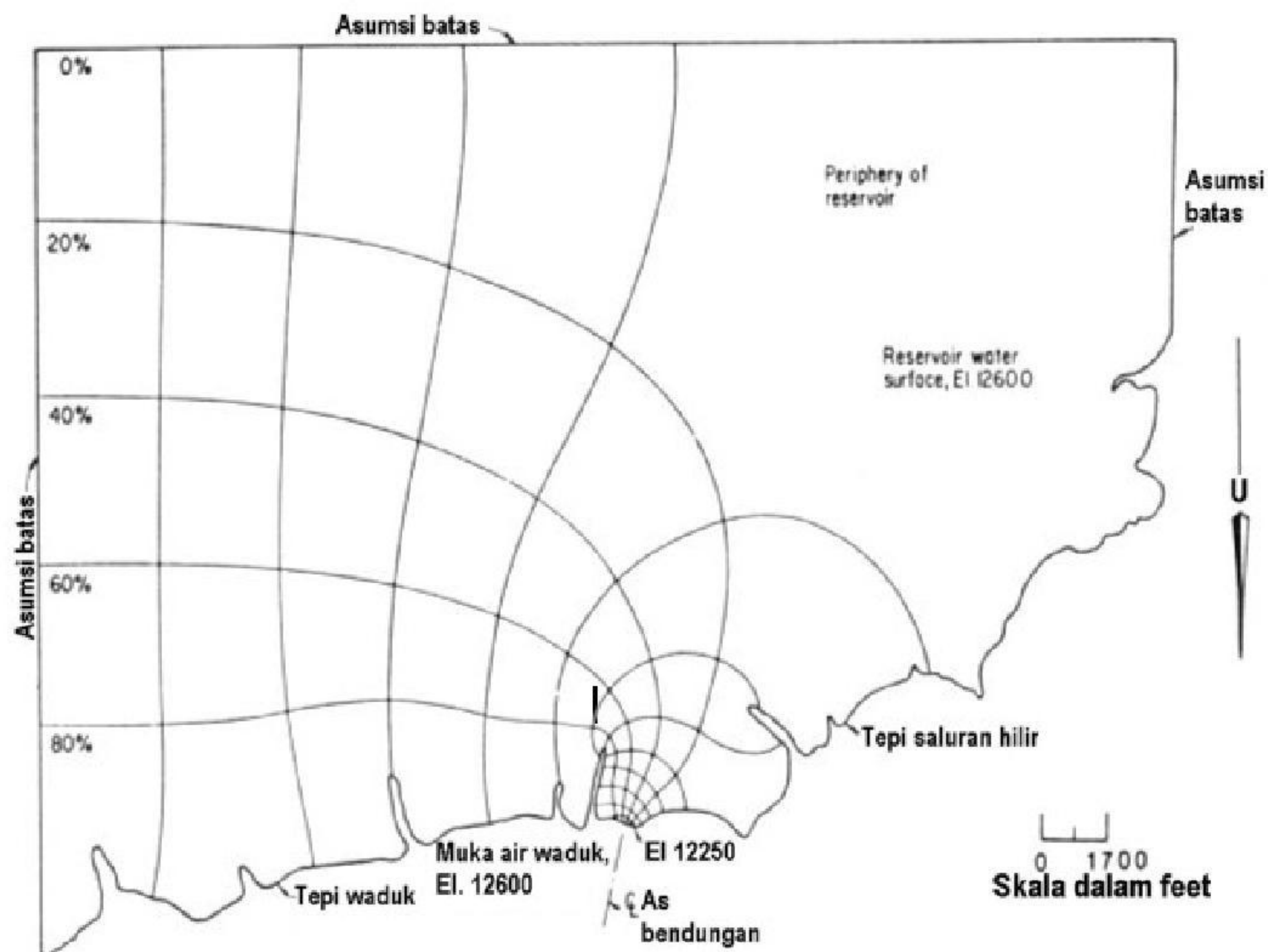


(b) Kondisi 50% surut cepat



(c) Kondisi 100 % surut cepat

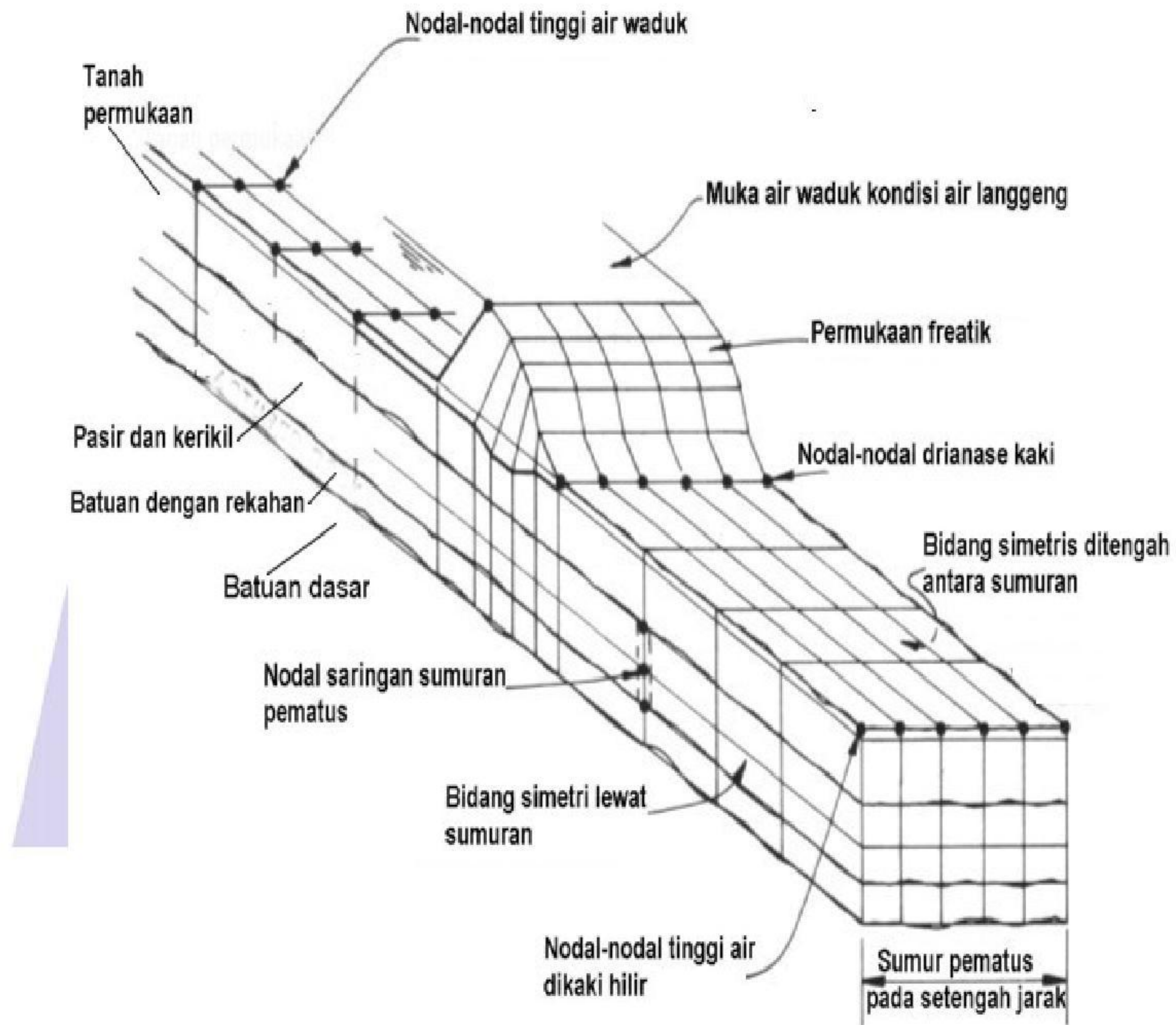
Gambar C.7 - Contoh tipe penggambaran jaring alir rembesan



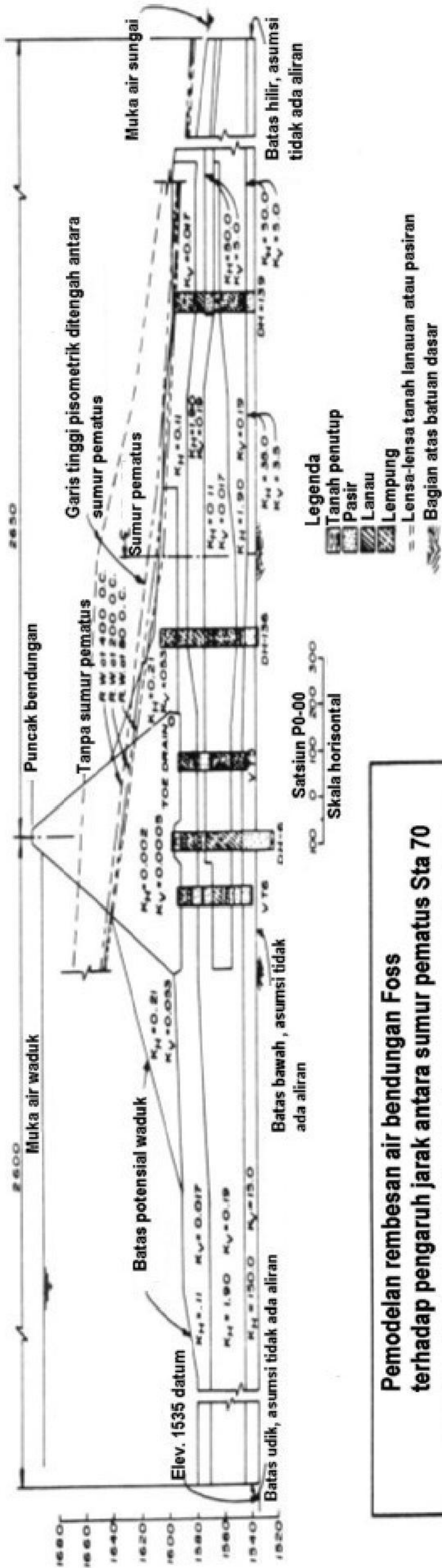
Catatan : Batuan dasar dianggap horisontal dan berfungsi sebagai lapisan drainase pada batas sebelah barat dam selatan. Elevasi dari keseluruhan permukaan drainase = 1225.0 . Batas timur dianggap kedap air. Tebal zona porus (d) = 5 ft.
 $N_f = 13$, $N_d = 5$, $k = 5 \text{ ft/d}$, $h = 1260 - 1225 = 35 \text{ ft}$.
 $Q = kh \frac{N_f}{N_d} d = (5 \times 35) \left(\frac{13}{5} \right) (5) = 2.280 \text{ ft}^3/\text{d}$

Gambar C.8 - Contoh jaring alir rembesan tiga dimensi

Lampiran D
(Informatif)
Contoh analisis rembesan air dengan cara elemen hingga



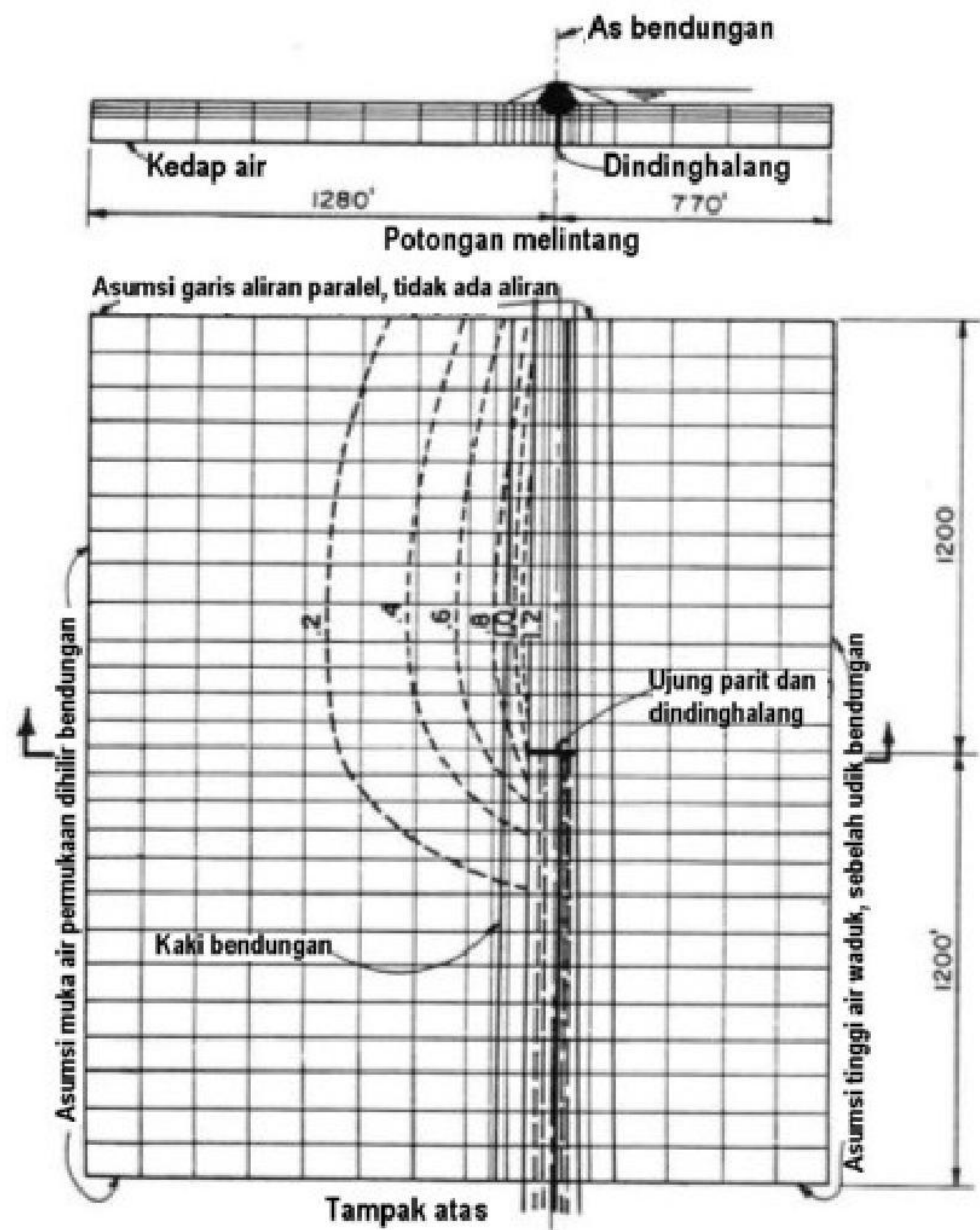
Gambar D.1 - Quasi – Model sumur pematics dengan elemen hingga tiga dimensi



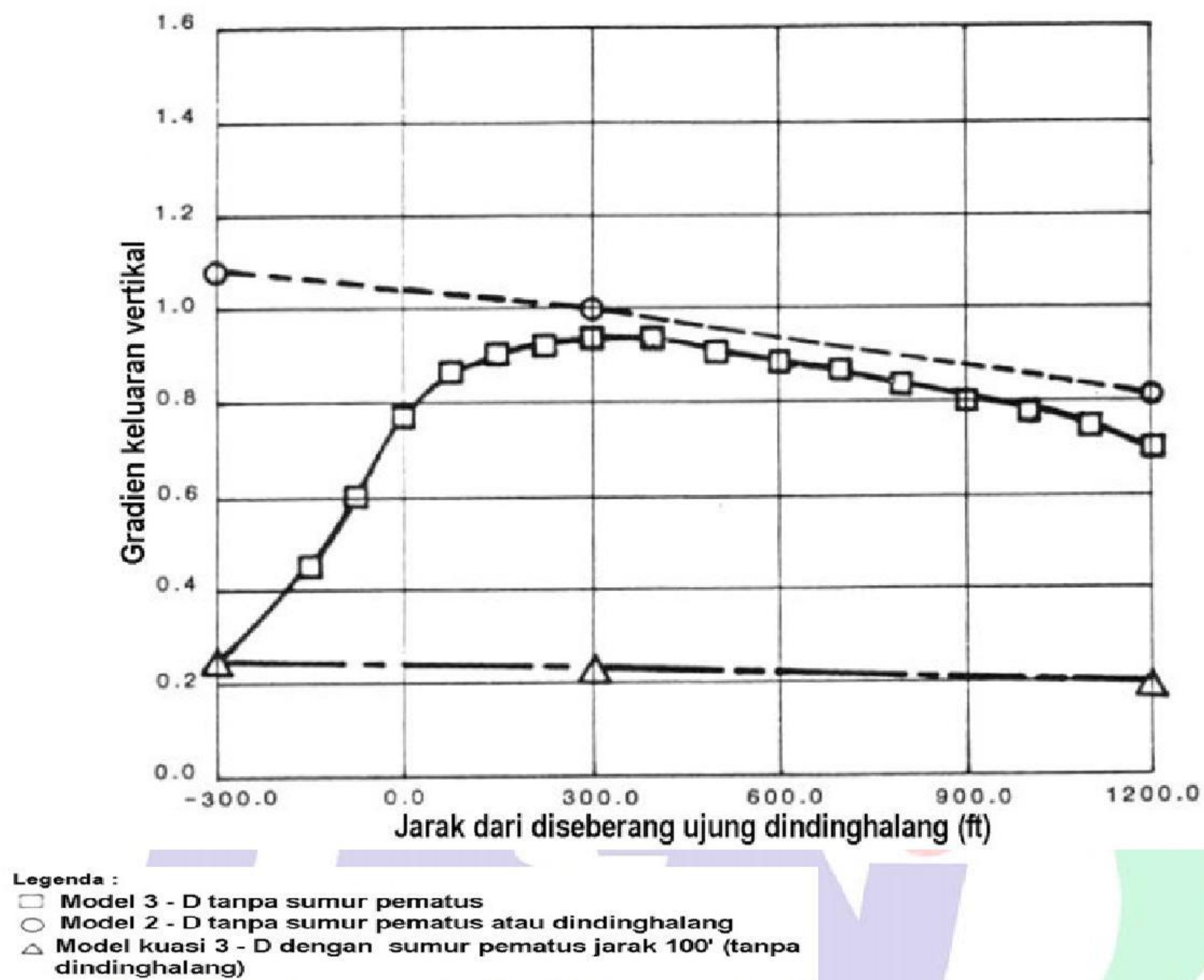
Pemodelan rembesan air bendungan Foss terhadap pengaruh jarak antara sumur pematus Sta 70				
	Tanpa sumuran	Jarak 400'	Jarak 800'	Jarak 80'
Tinggi tek. air dikaki	4.7'	1.4'	9'	7'
Gradien keluaran	0.7	0.1	0.1	0.1
Aliran per sumur		107 gal/min	60 gal/min	26 gal/min
Rembesan permukaan per 100'	14 gal/min	4 gal/min	3 gal/min	3 gal/min

Catatan :
Garis tinggi pisometrik sama dengan lapisan tanah diatas bagian atas batuan dasar.
Tanah terdiri dari lebih dari satu material di beri simbol sesuai materialnya.
 K_h = permeabilitas horisontal ft/hari
 K_v = permeabilitas vertikal ft/hari

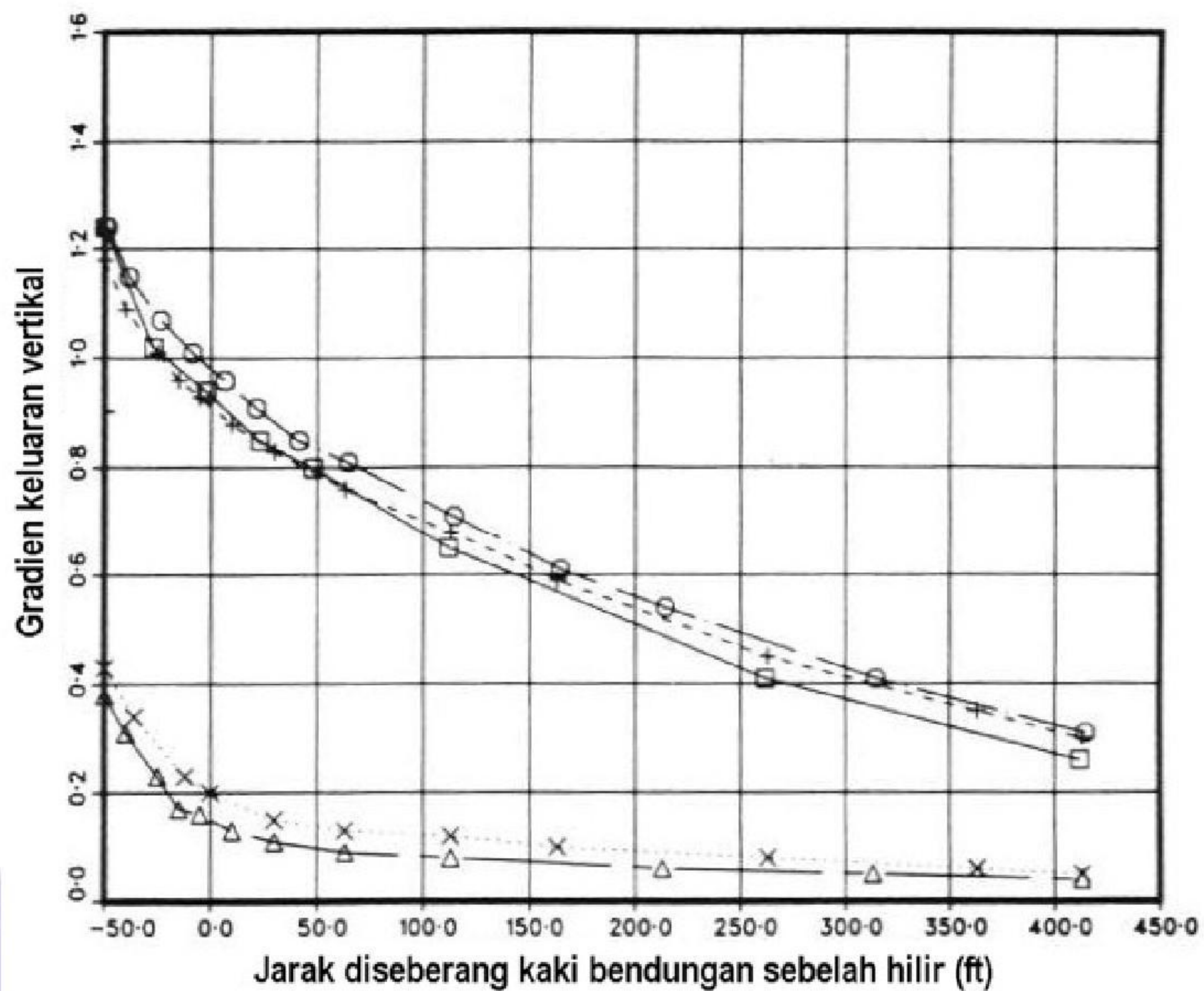
Gambar D.2 Studi sumur pematus elemen hingga kuasi tiga dimensi



Gambar D.3 - Kontur gradien keluaran studi model elemen hingga tiga dimensi



Gambar D.4 - Gradien keluaran vertikal studi model elemen hingga



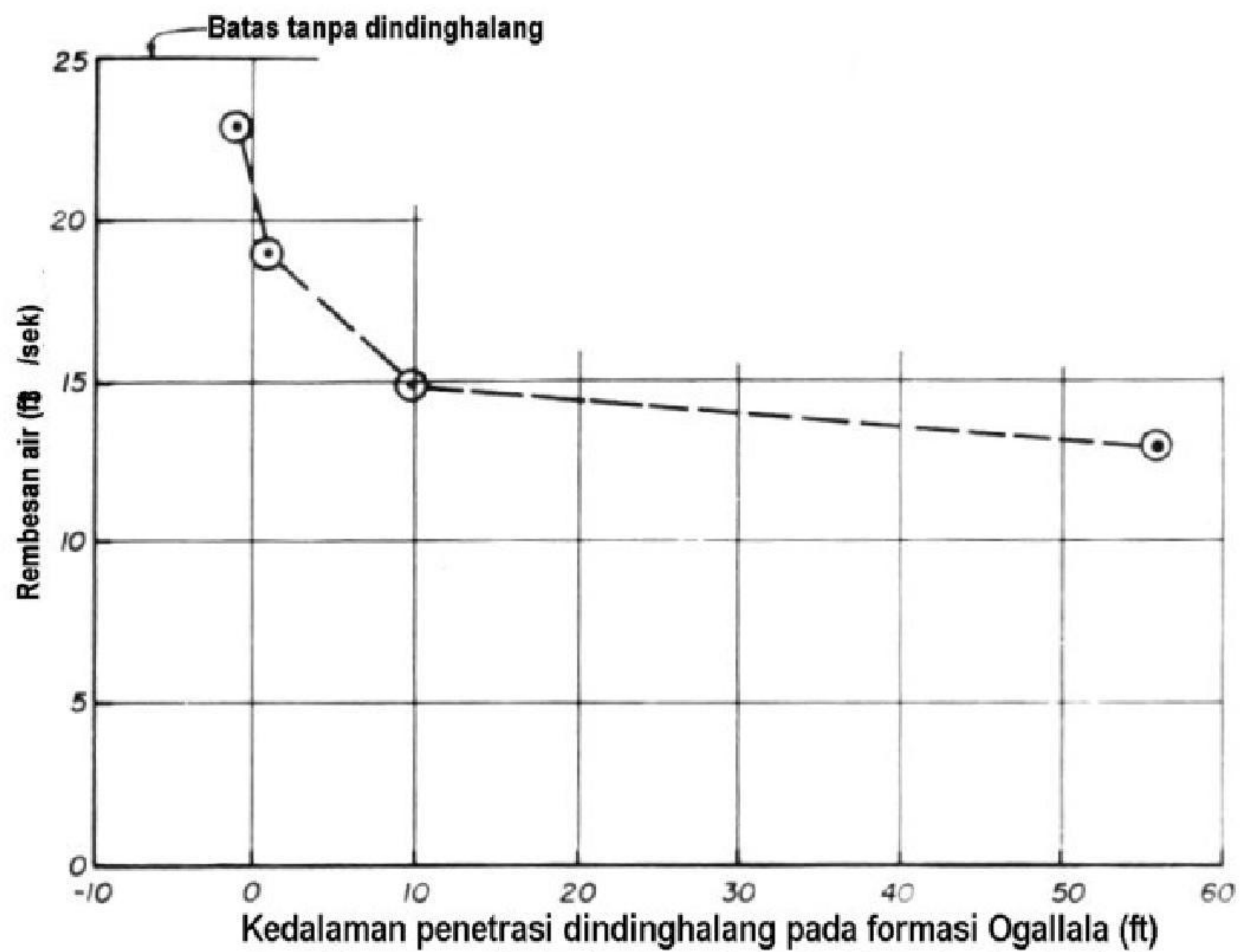
- = Run no 3A Model 3 - D tanpa sumur pematics
- = Run no 4A Model 2 - D tanpa sumur pematics
- △ = Run no 4A-3 - dengan sumur pematics 5x5 asumsi drainase bebas
- + = Run no 4A-6 - dengan sumur pematics 5x5 dengan diisi kerikil
- x = Run no 4A-7 - dengan sumur pematics 2x2 asumsi drainase bebas

Run 4A-3, 4A-6 dan 4A-7 dilakukan dengan model kuasi 3-D. Sumur pematics ditempatkan pada interval jarak 100 feet. Semua run diasumsikan sebagai aliran bebas lewat zona 2 di hilir.

Analisis rembesan untuk evaluasi stabilitas bendungan Narrows

Perbandingan gradien keluaran pada potongan 300 ft diseberang ujung parit slari

Gambar D.5 - Analisis rembesan studi model elemen hingga



Gambar D.6 - Studi rembesan model elemen hingga tiga dimensi bendungan Callamus yang mempengaruhi kedalaman penetrasi dinding halang terhadap bocoran

Bibliografi

- COREY, A.T.(1977), *Mechanics of Heterogeneous Fluids in Poreus Media*, Water Resource Publications, Fort Collins CO., 1977.
- Earth Manual (1974) , U.S. Department of The Interior, *Bureau of Reclamation*, Second Edition, Denver CO.
- EDERGREN, H.R. (1967), *Seepage, Drainage and Flownets*, John Wiley & Sons Inc., New York.,
- FREDLUND , D.G. (1962), "*Soil Mechanics For Unsaturated Soil*," John Wiley & Sons Inc., New York .
- Geo-Slope (1987), *PC-SEEP A Finite Element Program For Seepage Analysis*, Users Manual, Geo-Slope Programming Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
- HARR , M.E. (1962), *Groundwater and Seepage*, McGraw-Hill, New York NY.
- HIRSCHFELD, R.C. and S.J. POULOS, ed. (1973), *Embankment Dam Engineering Practice*, "Casagrande Volume, John Wiley and Sons, New York.
- LEONARDS, G.A. (1962), *Foundation Engineering*, McGraw-Hill, New York NY.
- National Academy Press (1983), *Safety of Existing Dams: Evaluation and Improvement*, National Academy Press , Washington DC.
- NAJOAN, TH.F. (1986), *Peralatan Electrical Resistant Network Analog ; Teori, Petunjuk Pemakaian dan Aplikasi untuk Studi Rembesan Air*, Puslitbang Air 128/BA-22/ 1986.
- NAJOAN, TH. F. (1993), "*Analisis Rembesan Air Dengan Menggunakan Cara Elemen Hingga (SEEP-2D)*," Short Course Computer Methods For Geotechnical Analysis, 11 Okt-13 Okt. 1993.
- PUSLITBANG SDA (Des 2000), *Analisis Transient Seepage Dengan Cara Elemen Hingga Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan di Nusa Tenggara Timur*, Hasil Penelitian Kelompok Bidang Keahlian Geoteknik dan Bangunan Air no 03/P3TSDA/LIT-01/2000 Puslitbang SDA, Balitbang Kimbang Praswil. Departemen Kimbang Praswil.
- SHERARD, J.L. , R.J. WOODWARD , S.F. GIZIENSKI, and W.A. CLEVENGER (1963), *Earth and Earth-Rock Dams*, John Wiley and Sons, New York NY, 1963.
- TERZAGHI, K and R.B. PECK (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, second edition, John Wiley and Sons , New York NY .
- USBR 1973, *Design Of Small Dams*, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- USBR (1984), *Seepage Analyses Using The Boundary Element Method*, US. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver CO., May 1984.

- USBR (1987), *Seepage Analysis and Control, Chapter 8, Design Standards Embankment Dams no. 13*, U.S. Department of The Interior, Bureau of Reclamation Engineering and Research Center , Denver CO. 1987.
- USBR (1987), *Static Stability Analyses, Chapter 4, Design Standards Embankment Dams no. 13*, U.S. Department of The Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver CO. 1987.
- WONG, K.S. and DUNCAN J.M. (1985), *SEEP : A Computer Program For Seepage Analysis of Saturated Free Surface or Confined Steady Flow*, Virginia Polytech. Intitute and State University.
- ZANGAR, C.N. (1953), *Theory and Problems of Water Percolation*, Engineering Monographs No. 8, U.S. Department of The Interior, Bureau of Reclamation, Denver CO.

